

Trabajo Fin de Grado

Herramienta para la definición de diferentes
estrategias de impresión en tecnología FDM.
Ensayos mecánicos

Autor

David Hedo Garcés

Directores

Francisco Javier Brosed Dueso

Jorge Santolaria Mazo

Grado de Ingeniería Mecánica

Escuela de ingeniería y arquitectura. EINA



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. David Hedo Garcés

con nº de DNI 73017204R en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado en Ingeniería Mecánica, (Título del Trabajo)

Herramienta para la definición de diferentes estrategias de impresión en
tecnología FDM. Ensayos mecánicos

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 16 de Noviembre de 2015

Fdo: David Hedo Garcés



Resumen

El mundo de la impresión 3D ha experimentado en los últimos años un crecimiento exponencial a nivel usuario con la liberación de algunas patentes. Sin embargo, poco se sabe a nivel usuario sobre las tecnologías que se pueden usar y cuáles son los métodos de impresión más adecuados. Existen diferentes tecnologías en el mercado aunque la que se ha popularizado, por la bajada de precios y la expiración de la patente, es el modelado por deposición fundida (FDM). El funcionamiento consiste en elevar la temperatura de un filamento de plástico termoplástico para que sea inyectado, a través de un inyector en una máquina de 3 ejes, sobre una base en la que se van creando las capas de material.

Son muchos los polímeros que se usan en la impresión 3D, en nuestro caso nos centramos en el PLA. A la hora de realizar la impresión, diferentes parámetros como el patrón de mallado o el relleno de la pieza pueden ser controlados. Aunque actualmente no hay ningún software que haga todas las capas de impresión a 0 grados o todas a 90 grados, para ello se hace un estudio del código de impresión para así poder hacer una herramienta informática para cambiar de trayectorias. Estos cambios de trayectorias influirán directamente en las características mecánicas de la probeta.

En este trabajo se han hecho probetas de diferentes trayectorias de impresión que son, todas a 0 grados y todas a 90 grados que estas direcciones de impresión nos daría la herramienta de definición de trayectorias hecha en Excel y las trayectorias de 0 grados - 90 grados intercalados y +45 grados – 45 grados intercalados hechas con un software comercial, en este caso Repetier Host.

Para finalizar se han realizado unos ensayos a tracción y flexión a las probetas para analizar su comportamiento.



Resumen	1
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Marco	4
1.2. Alcance	4
1.3. Objetivo	5
1.4. Descripción	5
2. ESTUDIO DE LA IMPRESIÓN 3D Y MATERIALES	6
2.1. Estado del arte de la impresión 3D	6
2.2. Tecnologías de impresión 3D	8
2.3. Impresora 3D utilizada	9
2.4. Material de impresión	10
3. ESTUDIO DE LA PROBETA, SOFTWARE Y CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN	12
3.1. Probeta	12
3.1.1. Normativa de ensayos de tracción	12
3.1.2. Diseño de las probetas de tracción	14
3.1.3. Normativa de ensayos de flexión	16
3.1.4. Diseño de las probetas de flexión	16
3.2. Software impresión 3D	17
3.2.1. Pronterface	17
3.2.2. KISSlicer	20
3.2.3. Repetier Host	23
3.2.4. Guía de uso de Repetier Host	27
3.3. Estudio del Código de Programación	31
3.3.1. Campos del Código de Programación	31
3.3.2. Código de programación para diferentes trayectorias	33
4. HERRAMIENTA PARA LA DEFINICIÓN DE TRAYECTORIAS	39
4.1. Estudio previo a la realización de la Macro	39
4.2. Macro	40
5. IMPRESIÓN EN 3D Y ENSAYOS MECÁNICOS	44
5.1. Ajustes de la impresora 3D	44
5.2. Impresión de la probeta	47
5.3. Ensayos Mecánicos	50



5.3.1. Ensayo de tracción	51
5.3.2. Ensayo de flexión	56
5.3.2. Conclusión de los ensayos mecánicos	60
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	63
Bibliografía	64
Anexos	66
Anexo I: Descripción de tecnologías de Impresión 3D	66
Anexo II: Características de materiales usados en tecnología FDM	73
Anexo III: Resultados de los ensayos de Tracción y Flexión	80



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Marco

El presente trabajo fin de grado se ha realizado en el área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación y en el departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza dentro de una línea de investigación que estudia la aplicación del prototipado 3D a la fabricación de plantillas, realizándose el estudio del comportamiento mecánico en el área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza.

1.2. Alcance

Este trabajo nace de la necesidad del estudio de las trayectorias de impresión de un proyecto de la Universidad de Zaragoza con la empresa Podoactiva para la fabricación de plantillas para los pies con unas determinadas características mecánicas. Actualmente no existen programas que permitan modificar esas trayectorias de impresión de formas sencilla ajustando los parámetros de la impresora.

Para resolver este problema en este trabajo se han abordado los siguientes puntos.

- Estudio de la situación actual del software de impresión para poder valorar todas posibilidades existentes de software y ver cual da mejores resultados para poder adaptarse mejor a este trabajo y el estudio de la normativa de ensayos mecánicos de plásticos para poder realizar ensayos mecánicos según la norma aunque actualmente, como la fabricación por impresión 3D es un sistema novedoso, no hay una norma específica para ello.
- Diseño de la probeta mediante la utilización de software CAD, en este caso Solid Works y de uso de ese CAD en formato .stl para la utilización en el software específico de impresión 3D para obtener el código Gcode.
- Modificación de las trayectorias de impresión mediante una macro automatizada en Excel que cambia las trayectorias de impresión según las necesidades del proyecto.
- Ajustes de todos los parámetros de impresión de la impresora 3D y del software para la fabricación de las probetas.
- Realización de ensayos mecánicos, en este caso a tracción haciendo una comparación de los resultados según el tipo de trayectoria en la impresión.



1.3. Objetivo

El objetivo de este trabajo fin de grado es desarrollar una herramienta que permita modificar la estrategia de impresión (dirección de las trayectorias de las diferentes capas) en la tecnología FDM (Modelado por Deposición Fundida) mediante una hoja de cálculo, en este caso Excel.

Se fabricarán probetas por FDM que serán ensayadas a tracción para establecer una relación preliminar entre el comportamiento mecánico de las mismas y la estrategia de impresión utilizada.

1.4. Descripción

El contenido de este trabajo fin de grado es de 4 puntos en los que se desarrollan los siguientes temas:

- Toma de contacto con la impresión 3D y estudio de materiales
- Estudio del software de impresión 3D
- Herramienta para cambiar las trayectorias de impresión.
- Impresión de las probetas y los ensayos mecánicos.



2. ESTUDIO DE LA IMPRESIÓN 3D Y MATERIALES

2.1. Estado del arte de la impresión 3D

El mundo de la impresión 3D se ha visto en los últimos años publicitado debido al auge que están teniendo en el público en general las impresoras 3D de bajo coste. Después de que en 2009 expirara la patente que la compañía americana Stratasys tenía sobre la tecnología de modelado de deposición fundida, FDM por sus siglas en inglés, el crecimiento que ha experimentado la impresión 3D ha resultado espectacular. [1]

Varios términos aparecen cuando se habla de la impresión 3D. Prototipado rápido, fabricación rápida o fabricación aditiva son términos que suelen usarse para referirse a este tipo de tecnología aunque de manera errónea ya que no todas tienen la misma implicación tecnológica.

El prototipado rápido, siguiendo la definición de Ian Gibson, es el proceso de creación de una pieza o sistema de manera rápida antes de su comercialización.[2] El prototipado rápido está centrado en la creación rápida de un producto o modelo base desde el cual puede ser derivado el producto final. Esta terminología no solo es usada en el ámbito de la fabricación sino también en la programación para denominar a aquellos programas que permiten al cliente probar su usabilidad. Con el paso de los años y la mejora de las técnicas de prototipado rápido, los productos resultantes están muchas de las veces más cerca de un producto final que de un prototipo en sí mismo dada la calidad y precisión con la que los objetos son fabricados.

En lo que respecta a la fabricación rápida (Rapid Manufacturing) no existe un consenso en el ámbito técnico en su definición ya que para algunos es simplemente el proceso de crear una pieza, que pueda o no ser la final, por cualquier método y que se realice de manera rápida. Otros autores definen la fabricación rápida como “el proceso de fabricación aditiva basado en un sistema CAD para construir piezas que pueden ser usadas como producto final” [3]

El hecho de que existiera esta variedad de nombres para intentar definir un mismo proceso hizo que la ASTM (American Society for Testing and Materials) formara un nuevo comité para decidir qué terminología sería aceptada. El subcomité F4291. [4] Finalmente se tomó como estándar el término “fabricación aditiva” (additive manufacturing) definido como el proceso por el que un modelo que ha sido generado previamente por ordenador usando un programa 3D CAD, puede ser fabricado directamente sin necesidad de planificación depositando material capa a capa, solo donde es requerido. De este modo evitamos formas de fabricación que no optimizan tanto el material como la fabricación subtractiva (torneado, fresado, etc) o la pieza por conformado. Dentro de este tipo de fabricación existen múltiples y variados procesos para llegar a la pieza resultante que se comentarán más adelante.

Los inicios de la fabricación aditiva tienen su origen en el año 1986 con las primeras patentes y desarrollos por compañías como 3DSystems, Stratasys o el propio MIT. En estos años, esta tecnología ha dotado a las empresas de una mayor flexibilidad en el



diseño, de una reducción del gasto energético y de un menor time to market. Como se puede observar son muchos los años que han transcurrido hasta que el concepto de “Impresión 3D” ha llegado al público en general, a pesar de no haber cambiado los conceptos tecnológicos que subyacen en esta idea.

El principal motivo ha sido las patentes que protegían este tipo de tecnología. Una vez expiradas estas, la revolución llegó al público en general.

La tecnología de impresión 3D a nivel industrial es muy eficaz para segmentos en los que el volumen de piezas no es muy elevado, como puede ser el de defensa o el aeroespacial. En el sector aeroespacial esto ha permitido reducir el ratio “buy to fly” – ratio de peso entre la materia prima y el producto acabado- en más de la mitad. Los conductos de los motores del caza F18 son un ejemplo del uso de la impresión 3D para crear piezas con formas complejas que permitan un mejor y más suave flujo de aire.

[5] Estos desarrollos están siendo llevados más si cabe al extremo por parte de unos investigadores de Filton, cuya idea es ser capaces de imprimir el ala entera de un avión.

Aunque la tecnología no ha avanzado, sí lo han hecho los materiales con los que podemos llevar a cabo la impresión. Así, si antes se usaba esta tecnología para hacer prototipos ahora permite, con esta gran variedad de materiales, realizar las piezas finales requeridas por los ingenieros. De hecho se estima que para el año 2020 el 80% de las piezas fabricadas por procesos aditivos serán producto final. Este caso lo podemos apreciar en la empresa de construcción de aeronaves EADS que suele usar impresoras 3D para convertir el polvo de titanio en su producto final con alturas de capa de 20-30 micras. [6]

No es solo en el ámbito militar o en el aeronáutico donde están presentes las impresoras 3D. En mayo del año 2013, unos médicos del hospital de Michigan (EEUU) lograron insertar una tráquea a un bebé para ayudarle en la respiración. Para ello se usó un material bioabsorbible por el cuerpo humano.[7] Queda demostrado que se pueden crear implantes anatómicos precisos, revolucionando de este modo también la medicina.

La impresión 3D ha llegado al público general para quedarse y está llamada a ser una tecnología que revolucione la forma de entender la logística y la producción. Hoy día con plataformas como “Thingiverse.com” cualquier usuario es capaz de descargarse un archivo y crear mediante su impresora la pieza que necesite. Este hecho puede resolver aquellos casos en los que se rompe una pieza de plástico de un electrodoméstico o es necesaria una escuadra para arreglar un mueble. Todo es posible con la impresión 3D.

Hoy en día cada vez más y más gente tiene en su casa una impresora 3D doméstica, lo cual está creando un nuevo mercado. Estas impresoras rondan los 500-1500€, un precio bastante inferior a las impresoras del sector industrial cuyos precios van desde los 15000€ hasta el millón de euros para el caso de las de titanio más sofisticadas.

Para que el mundo de la impresión 3D se adapte y amplíe su rango de aplicación se tendrá que enfrentar en los próximos años a varios retos. Mejorar el control del proceso es un aspecto fundamental para con ello incrementar la precisión y la fiabilidad de la pieza resultante. Imprimir piezas con una tolerancia más ajustada ya

que hay trabajos que requieren de micras de precisión. La obtención de un acabado que permita usar a la pieza como producto final. Y, por último, uno de los mayores retos a los que se enfrentan es la certificación y estandarización de las piezas para que puedan contar con los mejores estándares de calidad.

2.2. Tecnologías de impresión 3D

Los procesos de fabricación aditiva parten todos ellos de un modelo en 3D diseñado por ordenador que normalmente tiene la extensión STL (Stereo Lithography). Este archivo también puede ser extraído de un escáner en 3D, lo que favorece la reproducción de piezas.

El archivo STL contiene la información geométrica de la pieza representada en un mallado sencillo. Este archivo es posteriormente “rebanado” en capas 2D discretas para proceder a su impresión. Dicho proceso será descrito con mayor precisión en posteriores apartados. En la Imagen 1 se puede observar el cambio que esta tecnología ha creado en la fabricación de piezas. Desde una fabricación substractiva a una aditiva creada por capas.



Proceso fabricación en tecnología 3D

En el mercado se encuentran diferentes tecnologías para la realización de una pieza mediante impresión 3D. En este estudio seguiremos la clasificación ofrecida por la ASTM (American Society for testing and Materials) y separaremos las diferentes tecnologías en 7 tipologías diferentes como se observa en Tabla 1.[8]



Categoría	Descripción
<i>Binder jetting</i>	Un agente de unión es depositado de manera selectiva para unir el polvo
<i>Material jetting</i>	Pequeñas gotas de material son depositadas de manera selectiva
<i>Powder bed fusion</i>	Una fuente de energía funde selectivamente regiones de material en polvo
<i>Directed energy deposition</i>	Una fuente de energía derrite el material al tiempo que es depositado
<i>Sheet lamination</i>	Diferentes capas de material se van depositando en estado fundido
<i>Vat photopolymerization</i>	Un fotopolímero líquido es curado gracias a un foco de luz
<i>Material extrusion</i>	Un material es dispensado y dispuesto sobre una superficie de manera selectiva a través de un inyector

Diferentes tecnologías de prototipado rápido

En el Anexo I se describe con más detalle en qué consiste cada tecnología de impresión 3D

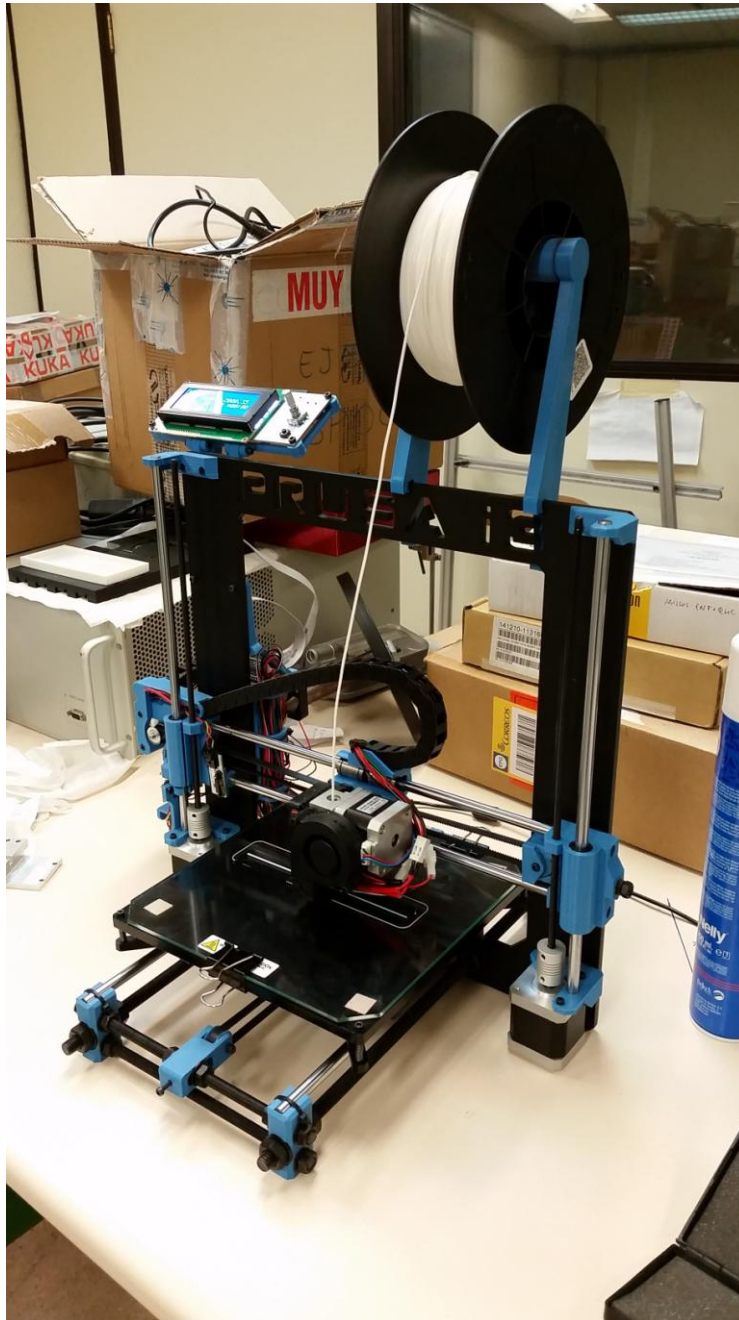
2.3. Impresora 3D utilizada

Para este trabajo fin de grado, la impresora 3D utilizada es la Prusa i3, dentro de la categoría de fabricación aditiva estaría dentro de las de “material extrusión” en concreto usa la tecnología FDM (Modelado por deposición fundida) en un proyecto de código abiertollamado Reprap.

Reprap que es una iniciativa creada con el propósito de crear una máquina de prototipado rápido de software libre que sea capaz de replicarse a sí misma. Una máquina de este tipo puede fabricar objetos físicos a partir de modelos generados por ordenador, de la misma manera que la impresora de un ordenador permite imprimir imágenes en dos dimensiones en papel, imprime objetos en 3D a base de plástico, permitiendo la fabricación de objetos, incluso puede generar las partes necesarias para construir otra máquina igual a ella. El proyecto Reprap fue iniciado en febrero del 2004 por el ingeniero Andrian Bowyer de la Universidad de Bath en Inglaterra, pero actualmente hay personas colaborando en otras partes del mundo en este proyecto.

Reprap está disponible bajo la licencia GNU GPL. Esta licencia permite que podamos copiar, estudiar, distribuir y mejorar sus diseños y código fuente. La comunidad que trabaja alrededor del proyecto puede mejorar los diseños actuales permitiendo que la máquina evolucione con el tiempo.

A nivel económico/social Reprap plantea grandes cambios: menos fábricas, menos necesidad de transporte de bienes, menos necesidad de dinero, más autonomía, más desarrollos tecnológicos locales, etc.



Impresora 3D usada en el trabajo

2.4. Material de impresión

Cuando se elige la impresora 3D hay que tener en cuenta muchos factores. Uno de ellos es el tipo de material que necesitamos para imprimir. Hay muchos tipos de plásticos y derivados, cada uno con sus ventajas e inconvenientes.

Para este TFG vamos a usar la tecnología FDM, para esta tecnología los materiales más usados son el ABS y el PLA. Como la impresora 3D utilizada es la Prusa i3 solo podemos usar PLA ya que es el único material que puede imprimir ya que para imprimir ABS



necesitaríamos que la cama de la impresora 3D fuese calefactada y este modelo de impresora no lo tiene

A continuación se detallan las características mecánicas más destacadas del PLA ya que es el material utilizado en este trabajo.

Propiedades Mecánicas PLA	
Alargamiento en la rotura (%)	45
Límite elástico(Mpa)	60
Módulo de tracción (GPa)	2,1-2,4
Resistencia a la tracción (MPa)	53
Módulo de Young (GPa)	3.5
Porcentaje de elongación(%)	6



3. ESTUDIO DE LA PROBETA, SOFTWARE Y CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

3.1. Probeta

3.1.1. Normativa de ensayos de tracción

Para el estudio experimental se han llevado a cabo pruebas de tracción basándose en la norma UNE ISO 527-2:2012

La elección de esta norma ha sido debido a que, ya que no hay una normativa específica para materiales impresos mediante modelado por deposición fundida, se ha elegido la norma UNE ISO 527-2:2012 porque hace referencia a polímeros fabricados por moldeo y extrusión y sería el proceso más parecido al modelado por deposición fundida.

Dentro de esta norma, establece la probeta de tipo 1A y 1B y para casos especiales en los que por las dimensiones no se puedan usar estas probetas, establece las probetas de tipo 5A y 5B.

Para determinar que probeta hay que fabricar se realizan unos cálculos para ver que probeta se adapta mejor a la máquina de ensayos.

La célula de carga de la máquina de ensayos es de 10000N, para hacer la comprobación tomamos las áreas de la probeta grande y de la pequeña

Área de la probeta grande(1A y 1B): $hxb = 4 \times 10 = 40 \text{ mm}^2$

Área de la probeta pequeña(5A y 5B): $hxb = 2 \times 5 = 10 \text{ mm}^2$

Límite elástico PLA: 60 MPa

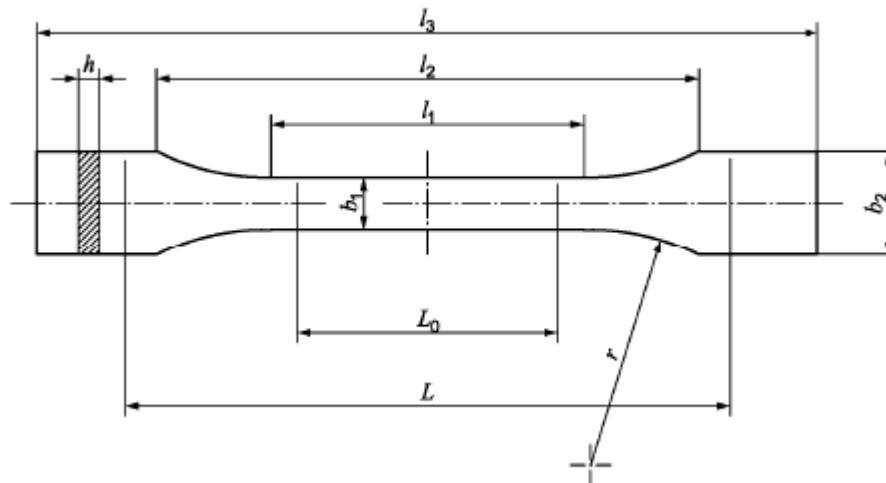
Con estos datos ya podemos sacar una estimación de la fuerza necesaria

Probeta grande: $60 \text{ Mpa} \times 40 \text{ mm}^2 = 2400 \text{ N}$

Probeta pequeña: $60 \text{ Mpa} \times 10 \text{ mm}^2 = 600 \text{ N}$

Tras realizar estos resultados, la probeta grande (1A y 1B) se adapta mejor ya que la fuerza necesaria se acerca más al valor de la célula de carga que la probeta pequeña (5A y 5B)

La norma establece las siguientes dimensiones para la probeta:



Probeta tipo 1A y 1B

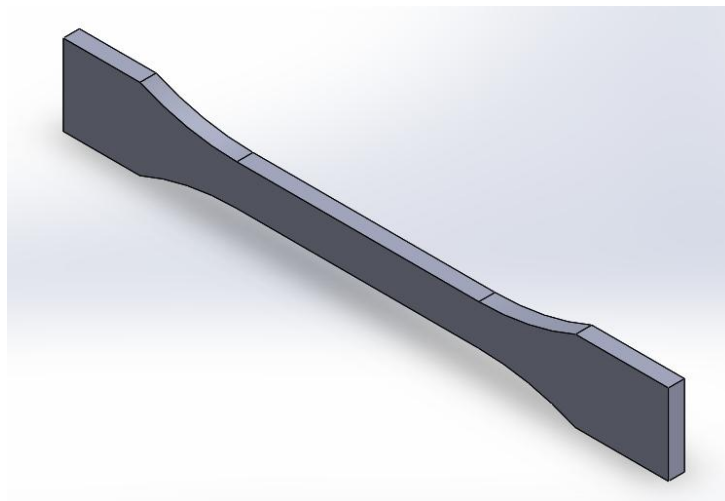
	Tipo de probetas	1A	1B
l_3	Longitud total ^a	170	≥ 150
l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r	radio	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2	Distancia entre las partes anchas de caras paralelas ^b	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2	Anchura en los extremos	$20,0 \pm 0,2$	
b_1	Anchura de la parte estrecha	$10,0 \pm 0,2$	
h	Espesor recomendado	$4,0 \pm 0,2$	
L_0	Longitud de referencia (recomendada) Longitud de referencia (aceptable si se requiere para el control de calidad o cuando se especifique)	$75,0 \pm 0,5$ $50,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
L	Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1	115 ± 1
^a La longitud total recomendada de 170 mm para el tipo 1A concuerda con las Normas ISO 294-1 e ISO 10724-1. Para algunos materiales, puede ser necesario alargar la longitud de los extremos (por ejemplo $l_3 = 200$ mm) para evitar la rotura o el deslizamiento en las mordazas de la máquina de ensayo. ^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, que resulta de l_1 , r , b_1 y b_2 , pero dentro de las tolerancias indicadas.			

Dimensiones normalizadas de las probeta de ensayo a tracción

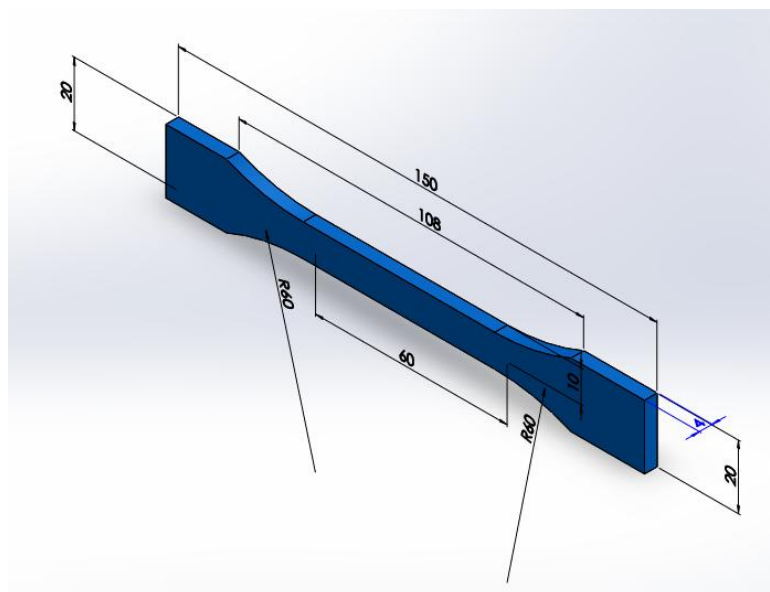
Tras saber las dimensiones de las probetas, el siguiente paso sería diseñarla en un programa CAD tal y como se explica en el siguiente punto.

3.1.2. Diseño de las probetas de tracción

Una vez definidas las dimensiones de la probeta se pasa al diseño de la misma en un programa CAD. En este caso se ha usado el programa de diseño SolidWorks 2014. El diseño de la probeta con las dimensiones anteriores quedaría definido del siguiente modo.



Probeta en SolidWorks



Probeta en SolidWorks con dimensiones normalizadas

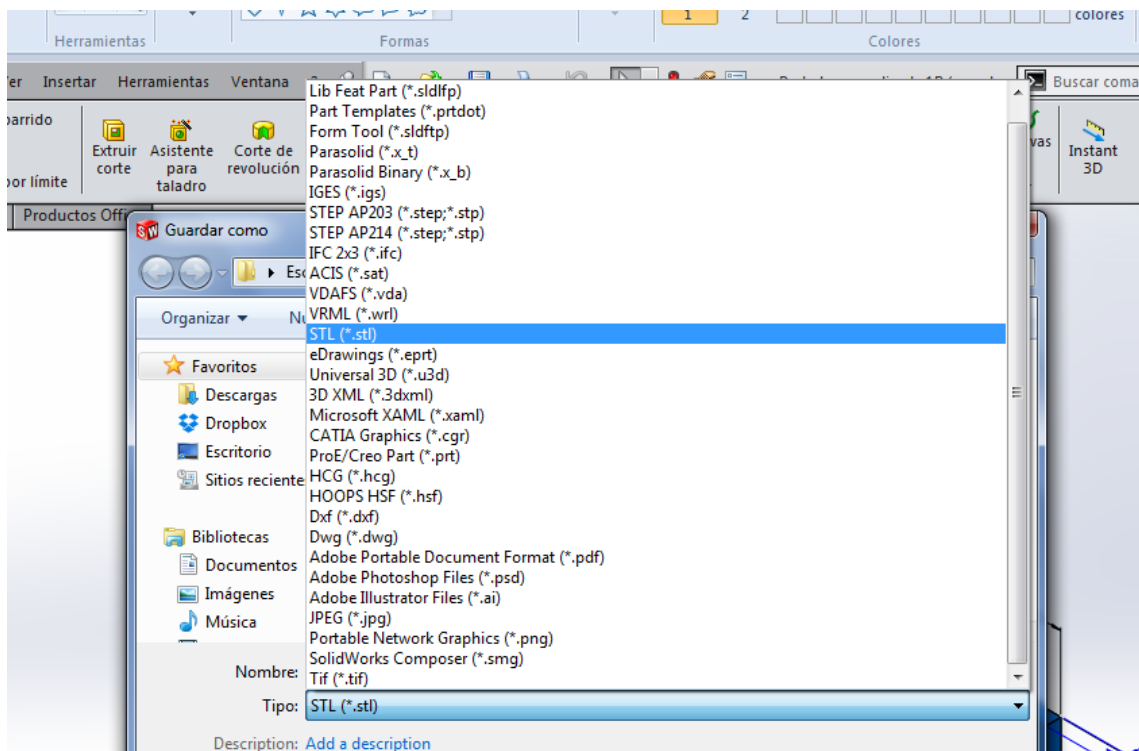
Para poder trabajar con el software de impresión 3D y que genere las trayectorias de impresión, el formato de archivo de SolidWorks no es válido, el formato necesario es STL

STL son las siglas provenientes del inglés 'Stereo Lithography' es un formato de archivo informático de diseño asistido por computadora (CAD) que define geometría de objetos 3D, excluyendo información como color, texturas o propiedades físicas que sí incluyen otros formatos CAD.

Fue creado por la empresa 3D Systems, concebido para su uso en la industria del prototipado rápido y sistemas de fabricación asistida por ordenador. En especial desde los años 2011-2012 con la aparición en el mercado de impresoras 3D el formato STL está siendo utilizado ampliamente por el software de control de las impresoras 3D

Para poder pasar del formato de SolidWorks u otro programa de CAD al formato stl lo haremos de la siguiente forma:

Una vez que tenemos la pieza acabada le damos a guardar como y en el tipo de formato elegiremos el formato STL



Proceso de guardado en formato STL

En este proyecto se ha utilizado SolidWorks pero con cualquier programa de CAD se podría haber hecho el diseño de la probeta ya que todos programas pueden guardar en el formato STL.

3.1.3. Normativa de ensayos de flexión

Para el estudio experimental se han llevado a cabo pruebas de flexión basándose en la norma UNE ISO 178

La norma establece en el punto 6.1.2 una probeta rectangular recomendada con las siguientes dimensiones:

Longitud: 80mm

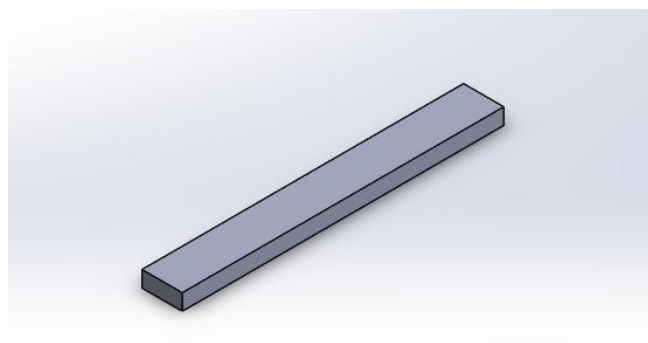
Anchura: 10 mm

Espesor: 4mm

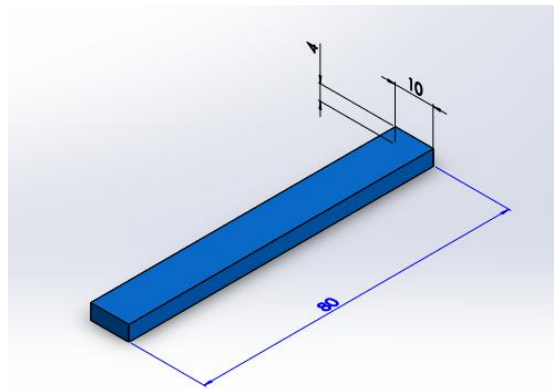
Tras saber las dimensiones de las probetas, el siguiente paso sería diseñarla en un programa CAD tal y como se explica en el siguiente punto.

3.1.4. Diseño de las probetas de flexión

Una vez definidas las dimensiones de la probeta se pasa al diseño de la misma en un programa CAD. En este caso se ha usado el programa de diseño SolidWorks 2014. El diseño de la probeta con las dimensiones anteriores quedaría definido del siguiente modo.



Probeta en SolidWorks



Probeta en SolidWorks con dimensiones normalizadas

Para poder trabajar con el software de impresión 3D y que genere las trayectorias de impresión, el formato de archivo de SolidWorks no es válido, el formato necesario es STL

Para pasar a formato STL se hace de igual forma que en las probetas de tracción, explicado en el punto 3.1.2.

3.2. Software impresión 3D

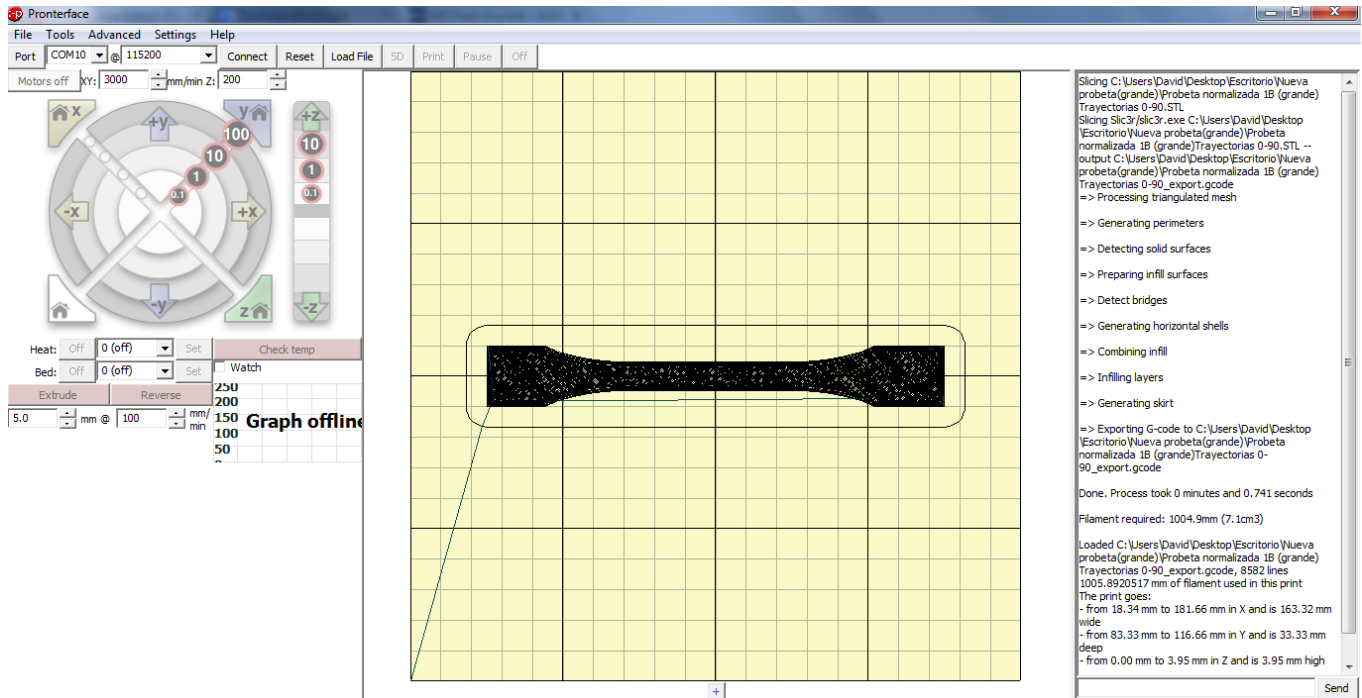
Con el auge de la impresión 3D hay en el mercado muchos programas con el que poder imprimir en 3D, para este trabajo se analizan 3 programas de código abierto.

La elección del software se va a determinar por la facilidad que dé para poder cambiar las trayectorias de impresión ya que el objetivo de este trabajo es ese.

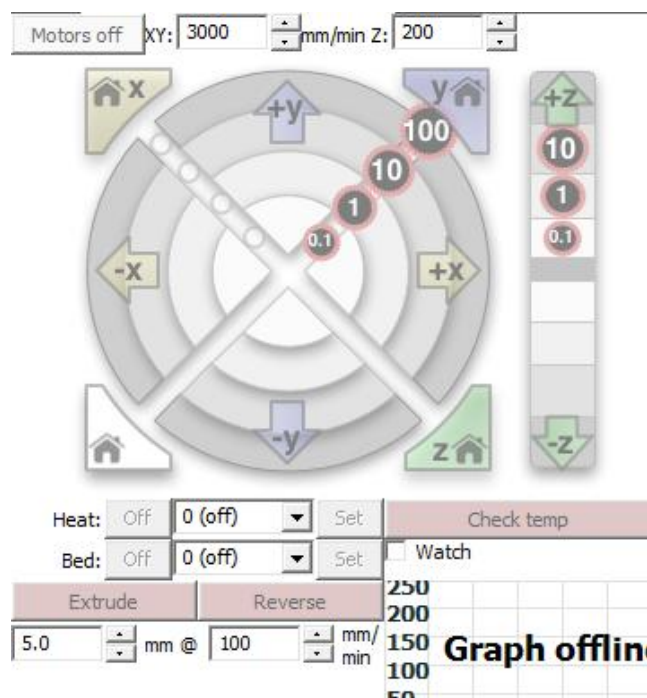
3.2.1. Pronterface

Pronterface es un software libre de código abierto licenciado bajo la GNU General Public License creado por Kliment Yanev.

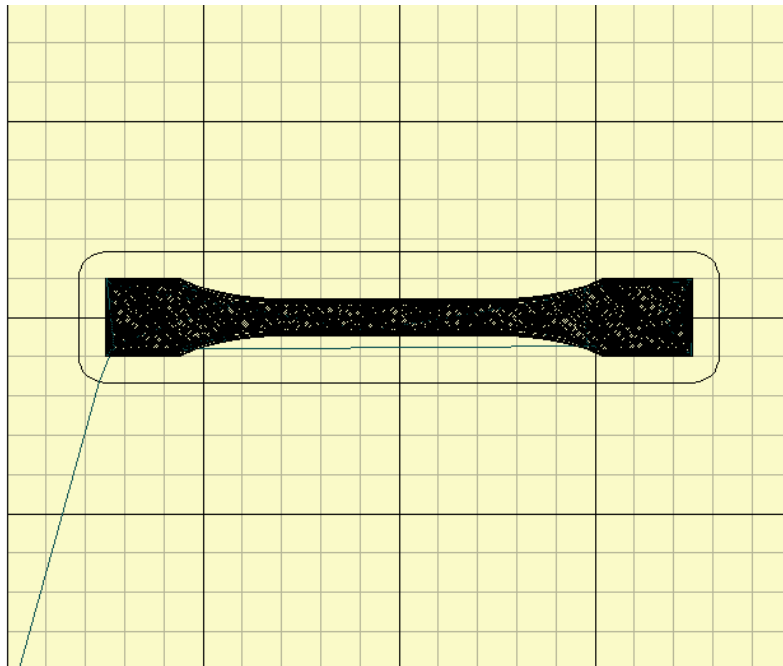
El aspecto de este programa al abrirlo y cargar la probeta es el siguiente:



Aspecto Pronterface

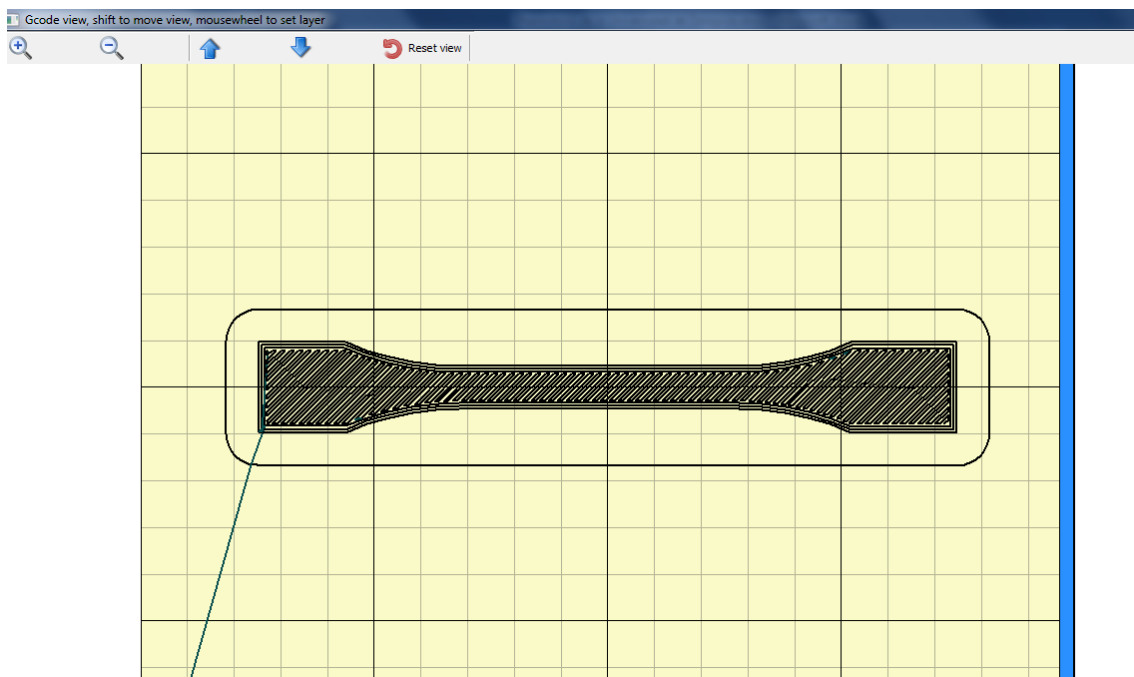


Controles Pronterface velocidad y temperatura

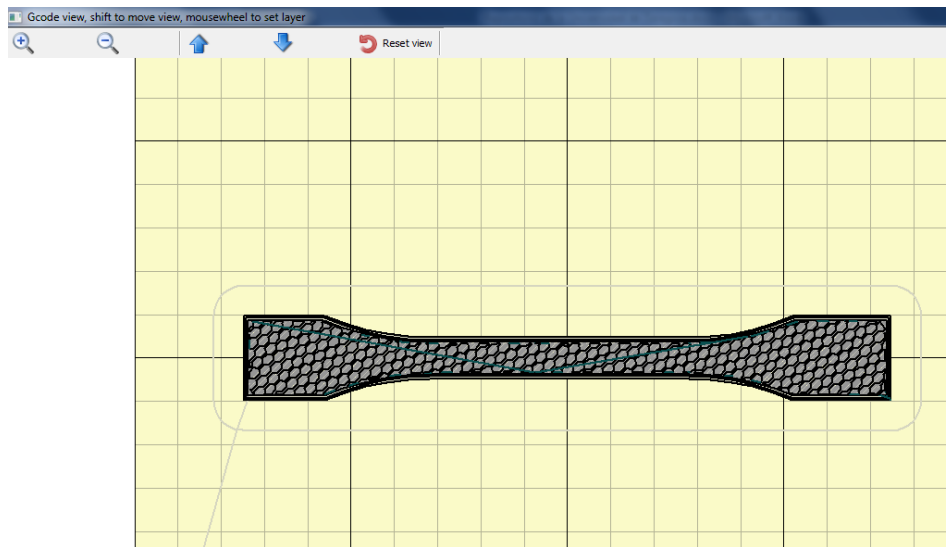


Visualización 2D en Pronterface

Para poder visualizar las capas de impresión hay que abrir una nueva ventana y a través de las flechas que hay arriba en la pantalla se va subiendo o bajando el nivel de la capa que se quiera visualizar.



Visualización en Pronterface de la capa 1 de impresión



Visualización en Pronterface de la capa 4 de impresión

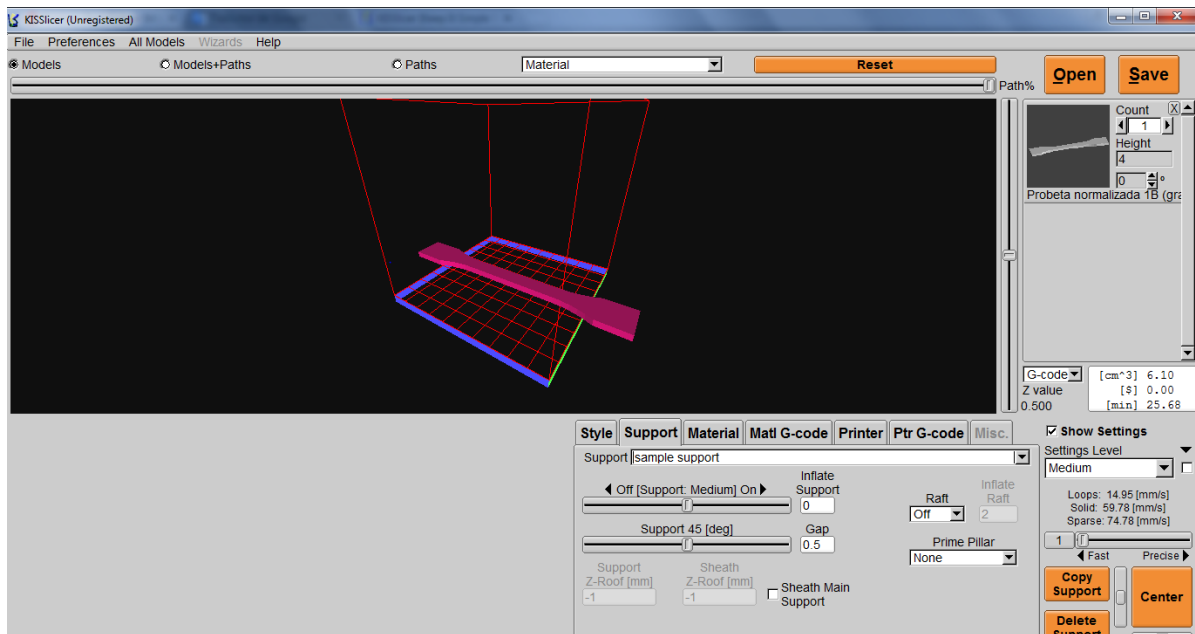
Una vez analizados todos los controles y menús principales del programa, se observa que las opciones que da el programa son limitadas, la visualización 3D no es precisa y no tiene ninguna opción de poder cambiar las trayectorias de impresión ni de poder ver el código de impresión, también llamado GCode (Explicado en el siguiente punto).

Por lo tanto este software lo descartamos para hacer este trabajo.

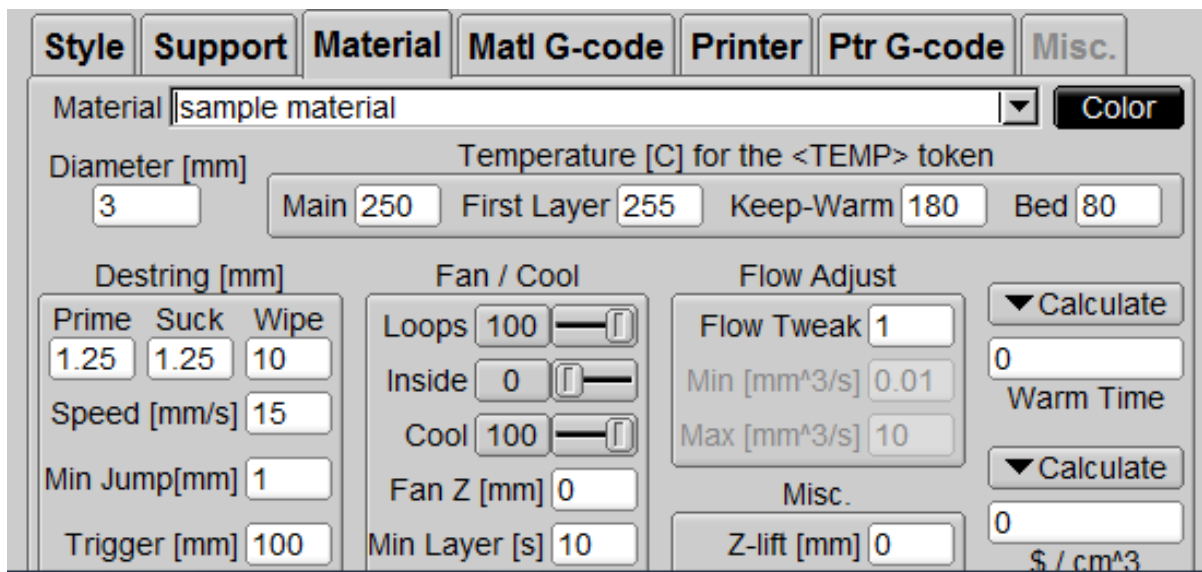
3.2.2. KISSlicer

KISSlicer (Keep it Slicer simple) es un programa de software libre para impresión 3D. Tiene dos versiones en el mercado, la versión gratuita, que es la usada en este análisis, te permite imprimir con un cabezal, la versión PRO que es de pago, te permite imprimir con dos cabezales.

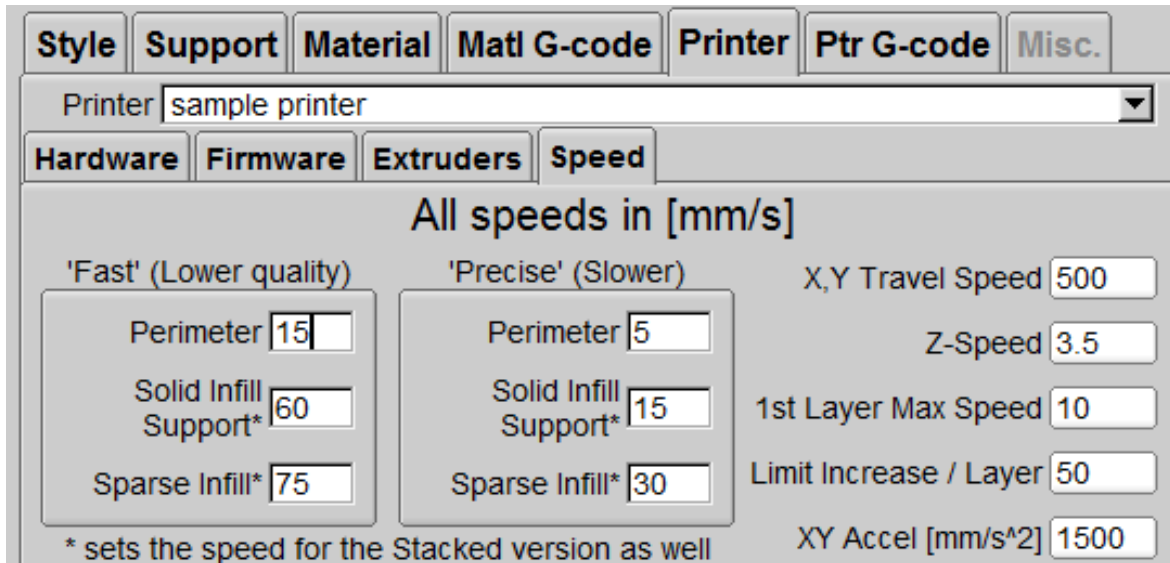
El aspecto de este programa al abrirlo y cargar la probeta es el siguiente:



Aspecto KISSlicer



Controles KISSlicer materiales



Printer: sample printer

Hardware Firmware Extruders **Speed**

All speeds in [mm/s]

'Fast' (Lower quality) 'Precise' (Slower)

Perimeter: 15 5

Solid Infill: 60 15

Sparse Infill*: 75 30

X,Y Travel Speed: 500

Z-Speed: 3.5

1st Layer Max Speed: 10

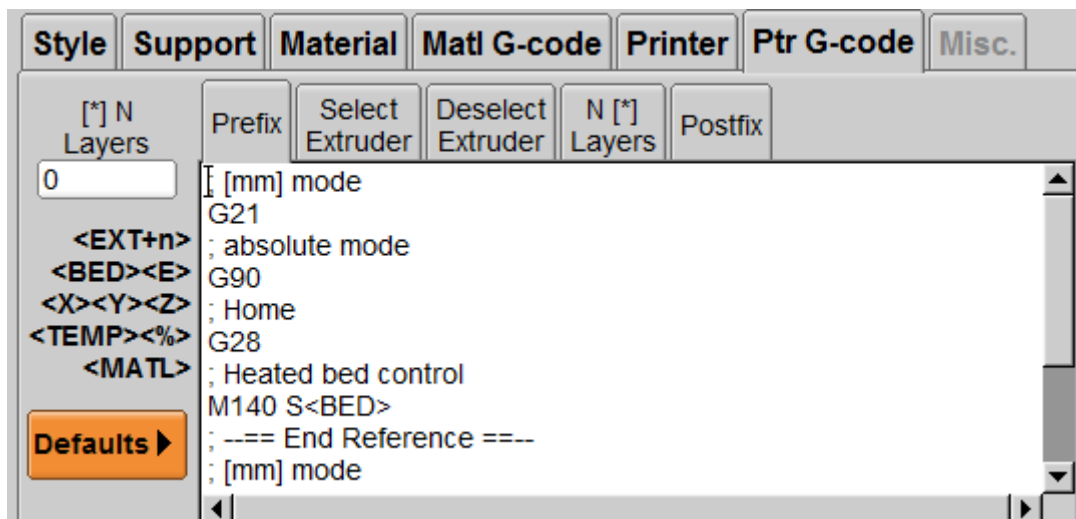
Limit Increase / Layer: 50

XY Accel [mm/s^2]: 1500

* sets the speed for the Stacked version as well

Controles KISSlicer velocidades impresión

Para este trabajo es necesario poder controlar el código GCode para poder modificar las trayectorias de impresión, en KISSlicer estas son las opciones que da de GCode.



Style Support Material **Matl G-code** Printer Ptr G-code Misc.

[*] N Layers: 0

Prefix: [mm] mode

Select Extruder Deselect Extruder N [*] Layers Postfix

G21 ; absolute mode

G90 ; Home

G28 ; Heated bed control

M140 S<BED> ; --- End Reference ---

[mm] mode

Defaults

Controles KISSlicer GCode

Una vez analizados todos los controles y menús principales del programa, se observa que las opciones que da el programa son más que en Pronterface, la visualización 3D es buena pero no tiene ninguna opción de poder cambiar las trayectorias de impresión ni de poder ver el código de impresión, también llamado GCode (Explicado en el siguiente punto).

Este software para nuestro trabajo tampoco sería válido ya que para cambiar las trayectorias de impresión se necesita poder ver el código de impresión, por lo tanto este software lo descartamos para hacer este trabajo.

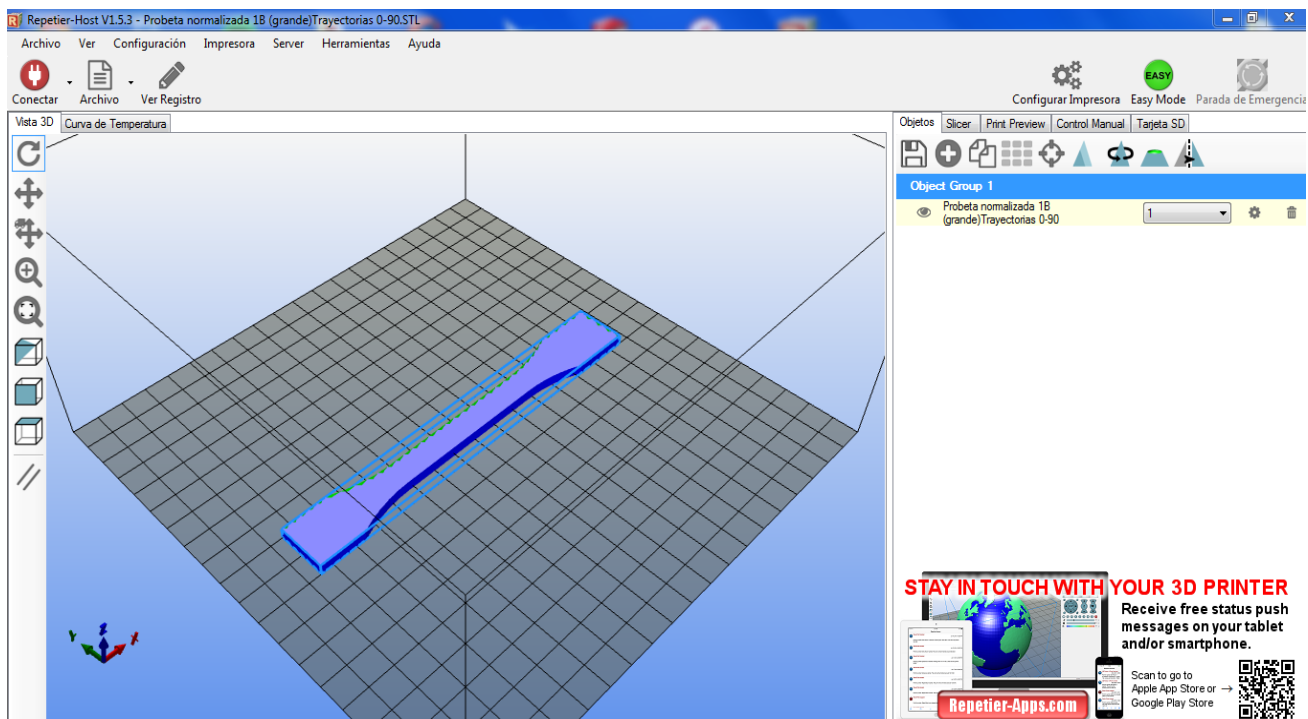
3.2.3. Repetier Host

Repetier Host es un programa de impresión 3D de software libre creado en Alemania por la empresa Hot-World GmbH & Co. KG.

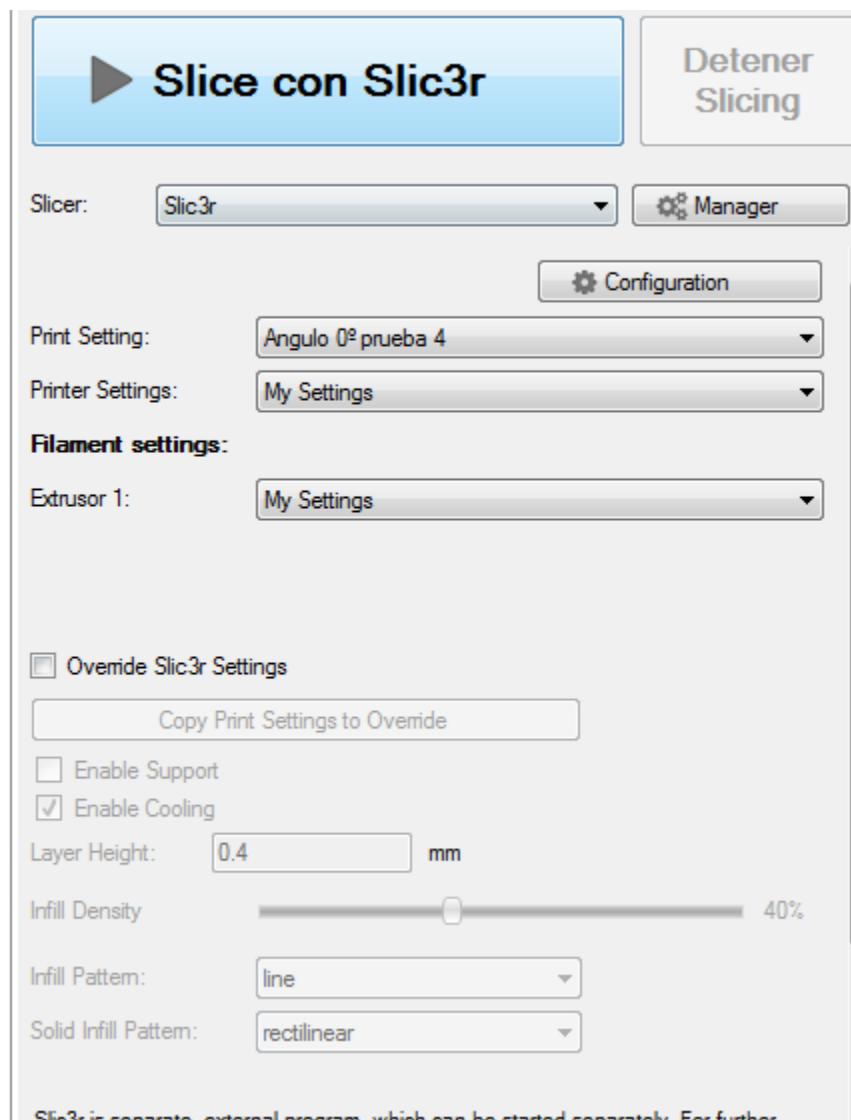
Repetier-Host incluye 2 diferentes rebanadoras: Slic3r y CuraEngine.

Después de cortar se puede ver todos los movimientos de la extrusora y estructuras de apoyo. Se puede controlar todo el modelo, un área en particular o capas individuales y reconocer los problemas potenciales antes de la impresión, esto ahorra mucho tiempo y dinero.

El aspecto de este programa al abrirlo y cargar la probeta es el siguiente:

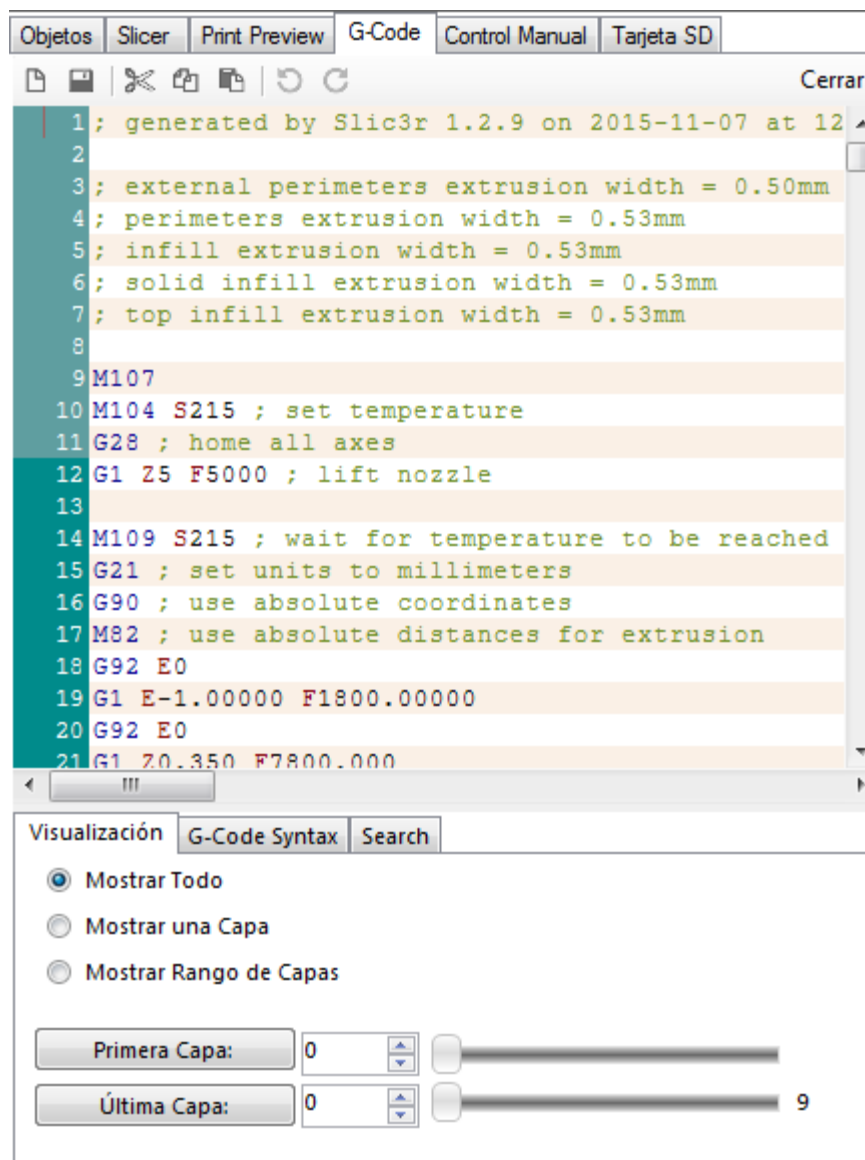


Aspecto Repetier Host



Menú Slic3r en Repetier

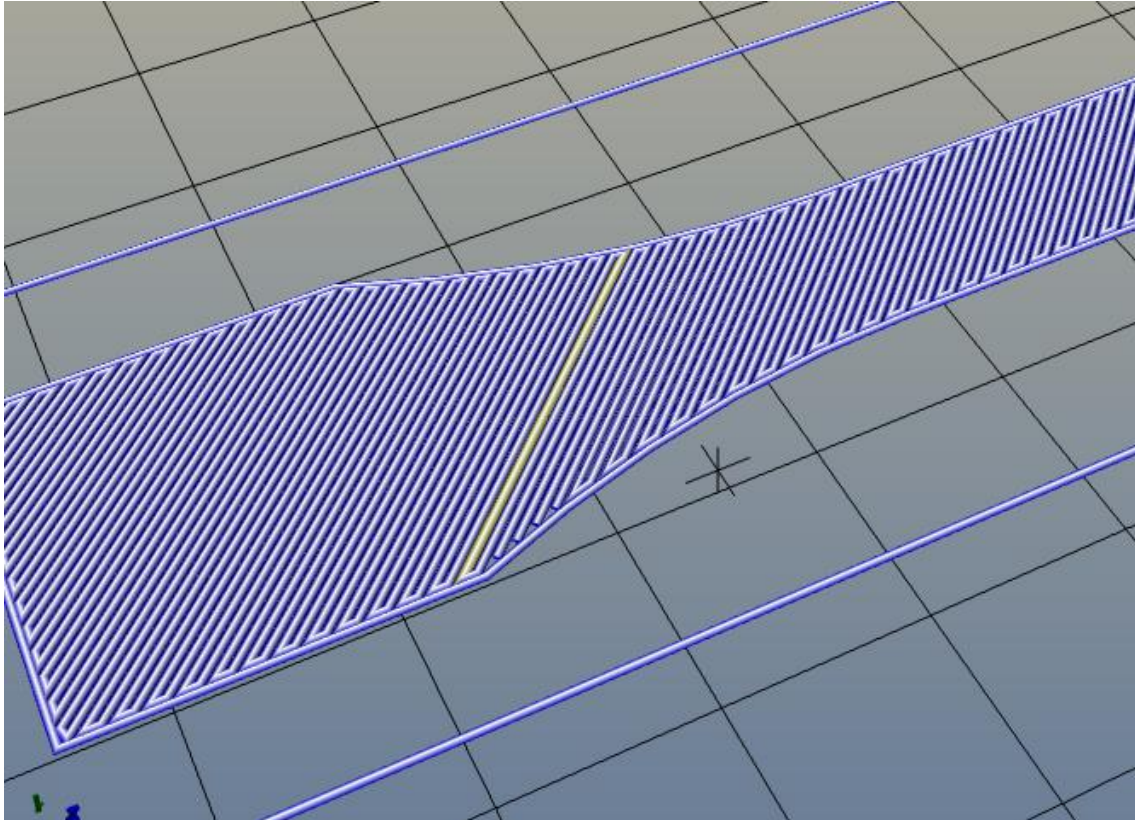
- **Slic3r** es una de las herramientas que se usa en el mundo del software libre para convertir el modelo en 3D en instrucciones de impresión para nuestra máquina. Esta herramienta corta el modelo en rebanadas, que luego serán las capas de nuestra pieza, genera el camino a seguir por la impresora y calcula la cantidad de material que será necesario para realizar la impresión correctamente.



GCode en Repetier

- **GCode** es el nombre que habitualmente recibe el lenguaje de programación usado en impresión 3D, en el punto 3.3 de este trabajo esta explicado en lo que consiste.

Una característica muy importante que tiene este programa es que cuando pinchamos en una línea del GCode, en la visualización de la pieza cambia de a color amarillo la trayectoria a la que pertenece esa línea de GCode como se muestra en la siguiente imagen.



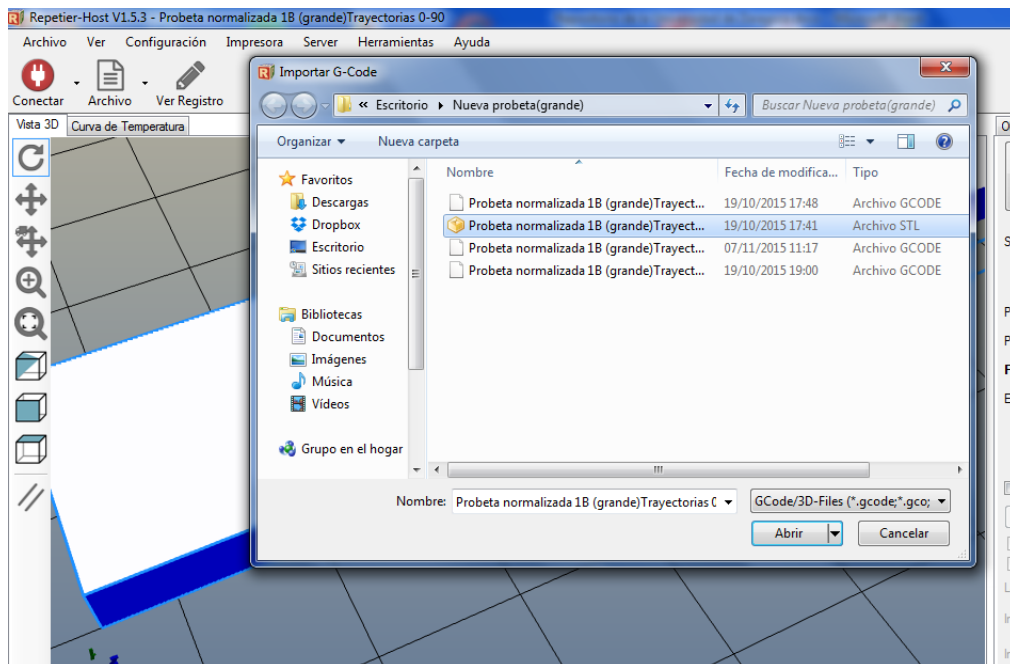
Visualización trayectorias GCode en Repetier

Una vez analizados todos los controles y menús principales del programa, se observa que las opciones que da el programa es más completa que cualquier otro programa analizado anteriormente, además para este trabajo es necesario poder ver el GCode completo viendo en cada momento cada línea de código a que capa pertenece y con este programa es posible, como se puede ver en la imagen 32.

Debido a las características necesarias de este trabajo, se elige trabajar con Repetier ya que con él se puede modificar las trayectorias de impresión.

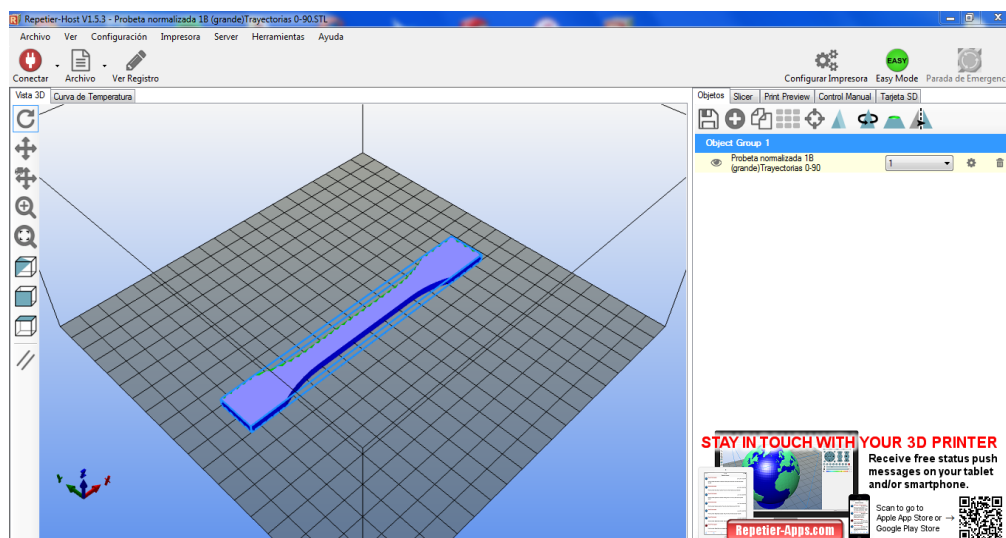
3.2.4. Guía de uso de Repetier Host

Una vez abierto el programa, hay que introducir la pieza que queremos imprimir en el formato STL, para ello iremos al menú superior donde pone Archivo y le volveremos a dar de nuevo a Archivo, se abre una ventana de búsqueda en la cual seleccionamos el archivo STL del directorio de nuestro PC donde lo tengamos guardado.



Abrir nueva pieza en Repetier

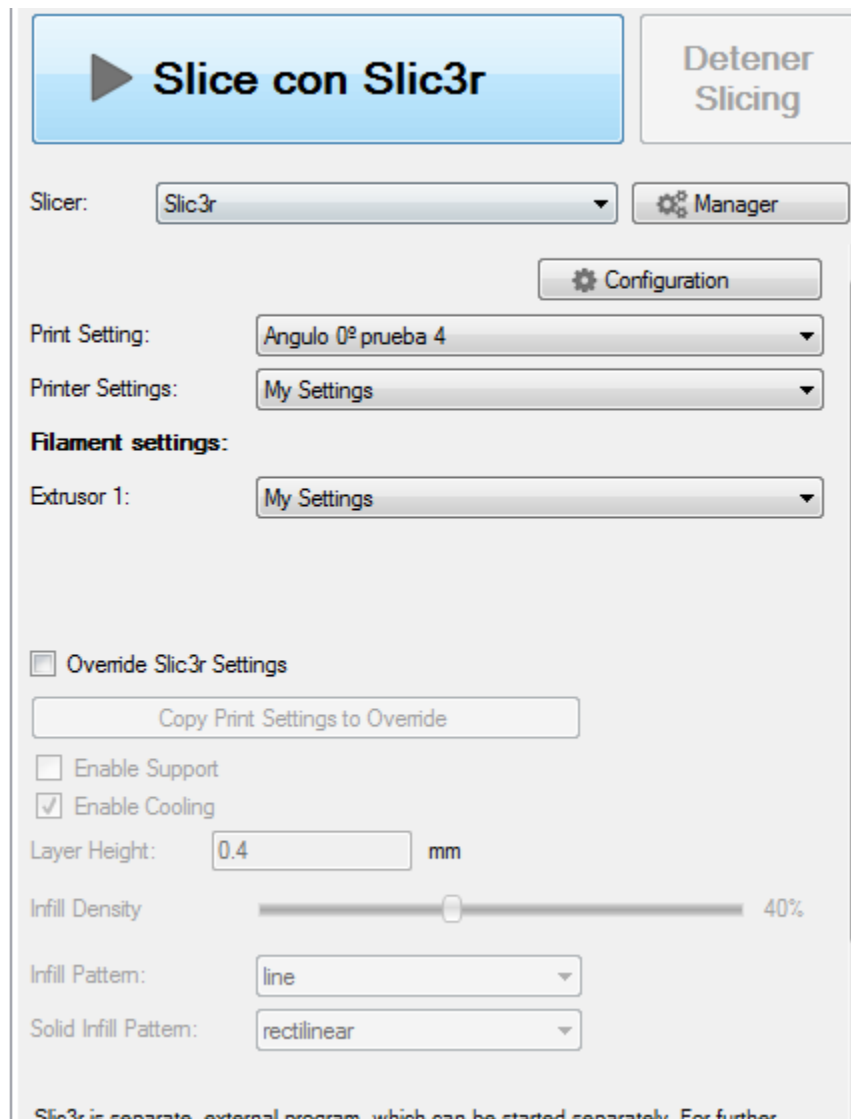
Una vez que le demos a aceptar nos aparecerá la siguiente ventana



Ventana inicio Repetier con la pieza para imprimir

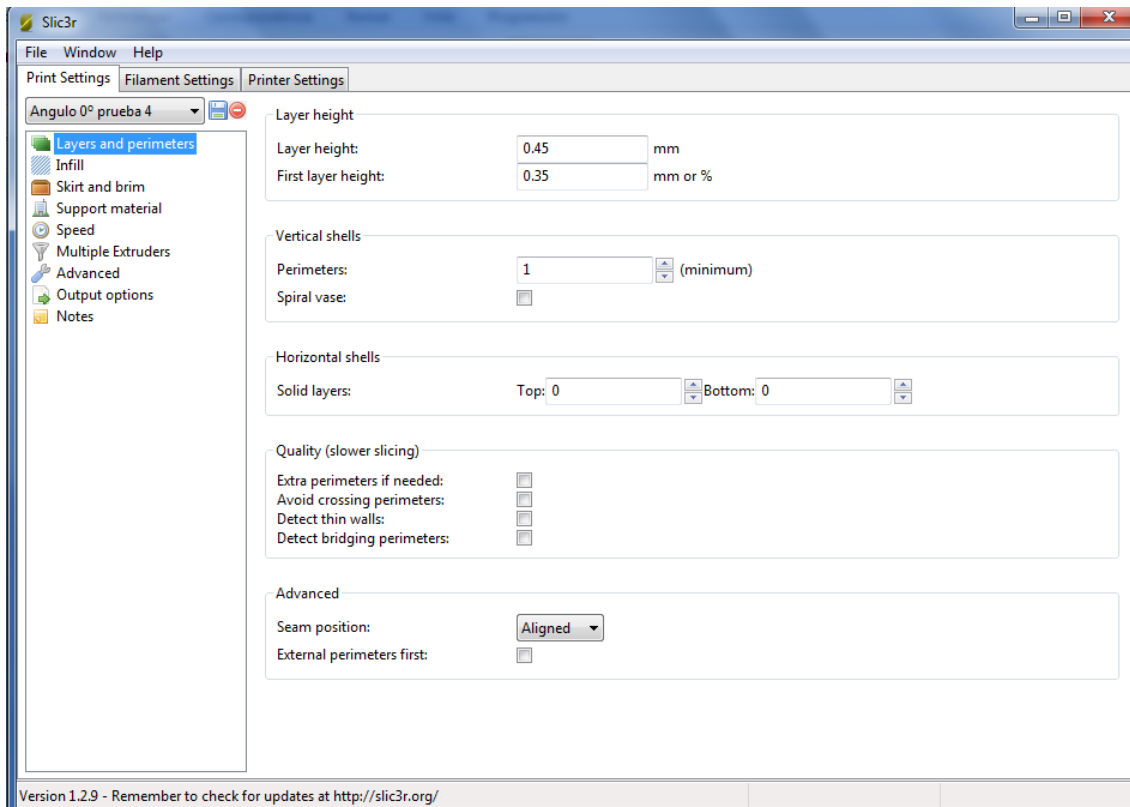
El siguiente paso es crear una configuración de impresión para así poder pasar el rebanador a la pieza, es este caso Slic3r ya que el otro rebanador que hay que es Cura no nos permite modificar cada línea de código. Para ello se siguen los siguientes pasos.

Le damos a “Configuration” dentro del menú de Slic3r



Configuración de un modo de impresión

Seguidamente se abre esta ventana en la cual podemos configurar todos los parámetros de la impresión y de la impresora 3D



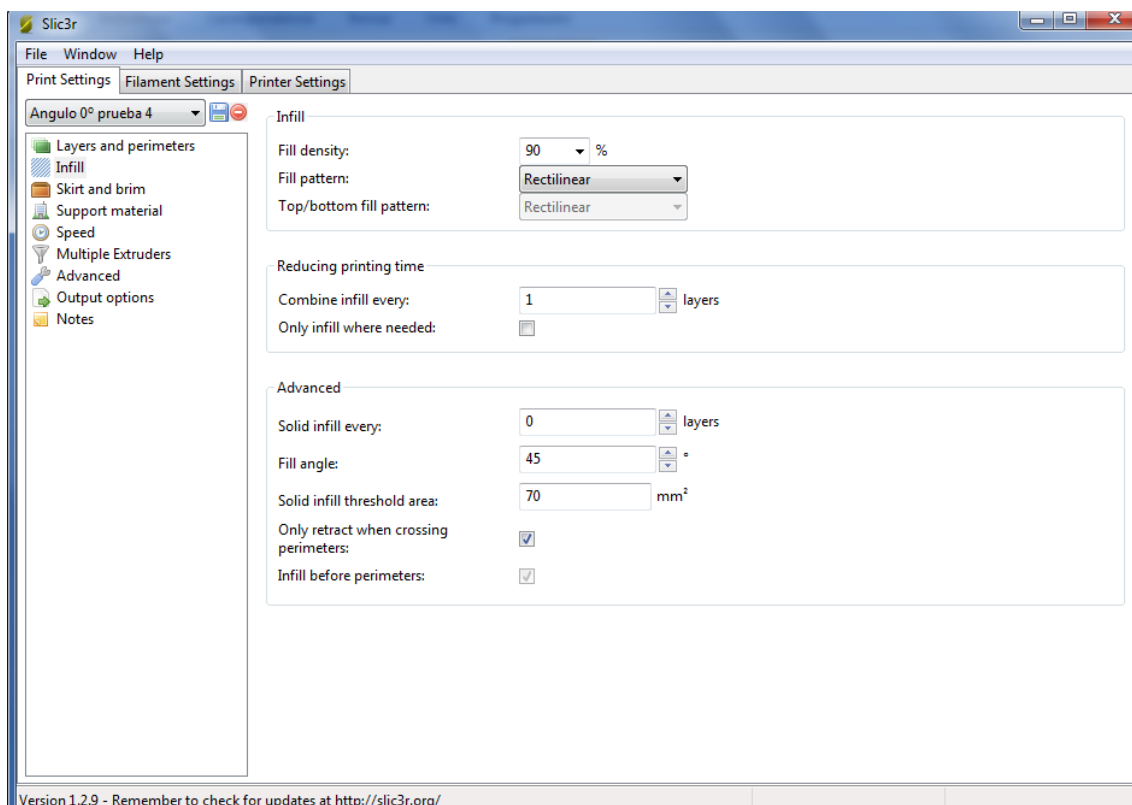
Configuración parámetros Sli3r

Pasamos a definir los parámetros con los que las probetas serán impresas. Para ello hemos de ir adaptando los parámetros de las diferentes ventanas de opciones del programa. La primera configuración es la de la impresión. En dicha ventana se encuentran múltiples opciones de configuración. La primera de ellas es “*Layers and perimeters*”, Perímetros y capas.

- **Layer Height** (Altura de capa): nos permite definir cuál va a ser el espesor de cada una de las rebanadas en que vamos a dividir la pieza. En el caso de este proyecto hemos escogido la calidad 0.45 mm por capa.
- **Vertical shells** (Armazón): con este parámetro controlamos el número de perímetros que crea en cada capa. Es decir, cuantas pasadas -hilos de material- deposita antes de empezar con el relleno propiamente.

- *Horizontal shells* (Caparazón horizontal): se definen el número de capas con relleno completo que cerrarán arriba y abajo la pieza. En este caso no tendrá ninguna capa de relleno de cierre ya que queremos que todas las trayectorias sean de la misma densidad de material, esta opción se usa para la fabricación de piezas en las que queremos aligerar peso y ahorrar material de impresión haciendo las capas interiores con capas de menos densidad y la primera capa y última se rellenan enteras para que haga de cierre de la pieza.

La siguiente pestaña es aquella en la que se definen los parámetros relativos al relleno (*Infill*) de la pieza. En este caso se realizan diferentes probetas con configuraciones variadas. En la casilla “*fill density*” seleccionamos el porcentaje de relleno que tendrá la pieza. En este caso un 90%. De igual modo, en la configuración avanzada podemos seleccionar el ángulo que deseamos que tenga nuestro mallado que para este trabajo será de 0º, 90º y 45º



Configuración de las capas en Sli3r

En este punto está la explicación de cómo poner correctamente una configuración en Repetier para poder sacar el código GCode y ver las trayectorias de impresión, en el punto 5 de este trabajo se seguirá explicando cómo seguir modificando la configuración para imprimir.

3.3. Estudio del Código de Programación

GCode es el nombre que habitualmente recibe el lenguaje de programación más usado en Control numérico (CNC), el cual posee múltiples implementaciones. Usado principalmente en automatización, forma parte de la ingeniería asistida por computadora. Al GCode se le llama en ciertas ocasiones lenguaje de programación G.

En términos generales, GCode es un lenguaje mediante el cual las personas pueden decir a máquinas herramienta controladas por computadora qué hacer y cómo hacerlo. Esos "qué" y "cómo" están definidos mayormente por instrucciones sobre adonde moverse, lo rápido que pueden moverse y que trayectoria seguir. Las máquinas típicas que son controladas con GCode son fresadoras, cortadoras, tornos e impresoras 3D.

3.3.1. Campos del Código de Programación

En este apartado se explican los campos que van precedidos por una letra en el código GCode.

En cada línea de código aparecen unos números con unas letras delante de ellos que tienen un significado para el programa como se puede ver en la siguiente imagen.

```
117 G1 X95.674 Y75.362 E33.33922
118 G1 X104.326 Y84.013 E34.45174
119 G1 X104.326 Y84.699 E34.51408
120 G1 X95.674 Y76.047 E35.62660
121 G1 X95.674 Y76.733 E35.68894
122 G1 X104.326 Y85.384 E36.80146
123 G1 X104.326 Y86.070 E36.86380
124 G1 X95.674 Y77.418 E37.97632
```

A continuación se resume el significado de cada letra del GCode.

Letra	Significado
Gnnn	Comando GCode estándar, como moverse hasta un punto
Mnnn	Comando definido por RepRap, como encender un ventilador
Tnnn	Seleccionar la herramienta nnn. En RepRap, las herramientas son extrusores



Snnn	Parámetro de comando, como la tensión enviada a un motor
Pnnn	Parámetro de comando, como el tiempo en milisegundos
Xnnn	Una coordenada X, normalmente para moverse a ella. Puede ser un número entero o racional.
Ynnn	Una coordenada Y, normalmente para moverse a ella. Puede ser un número entero o racional.
Znnn	Una coordenada Z, normalmente para moverse a ella. Puede ser un número entero o racional.
Innn	Parámetro - Actualmente no utilizado
Jnnn	Parámetro - Actualmente no utilizado
Fnnn	Feedrate en mm por minuto. (Velocidad de movimiento del cabezal de impresión)
Rnnn	Parámetro - usado para temperaturas
Qnnn	Parámetro - Actualmente no utilizado
Ennn	Longitud a extruir en mm. Ex exactamente como X, Y y Z, pero para la cantidad de filamento a extruir
Nnnn	Número de línea. Utilizado para pedir la repetición de la transmisión en caso de errores de comunicación.



*nnn	Checksum. Usado para comprobar errores de comunicación.
------	---

3.3.2. Código de programación para diferentes trayectorias

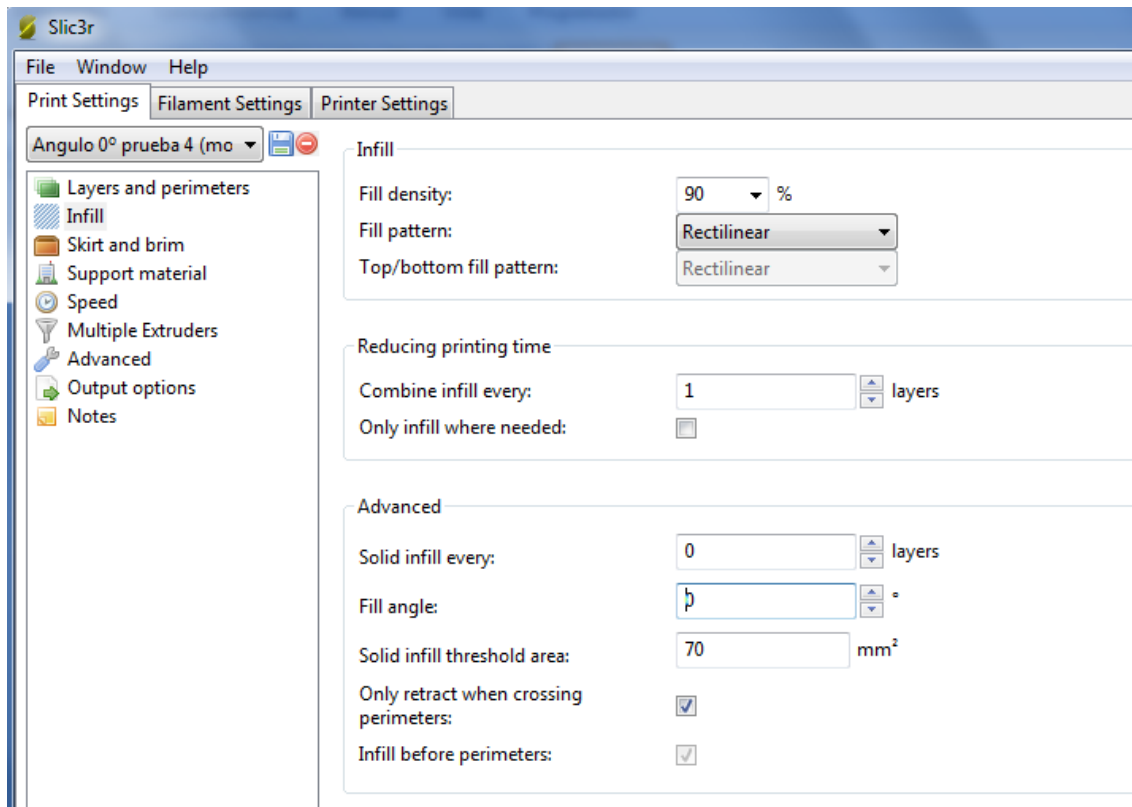
Para este trabajo se necesita poder imprimir varias probetas de diferentes trayectorias para poder realizar los ensayos mecánicos y después poder comparar los resultados para ello se necesitan diferentes GCode para cada probeta.

Esas trayectorias son de:

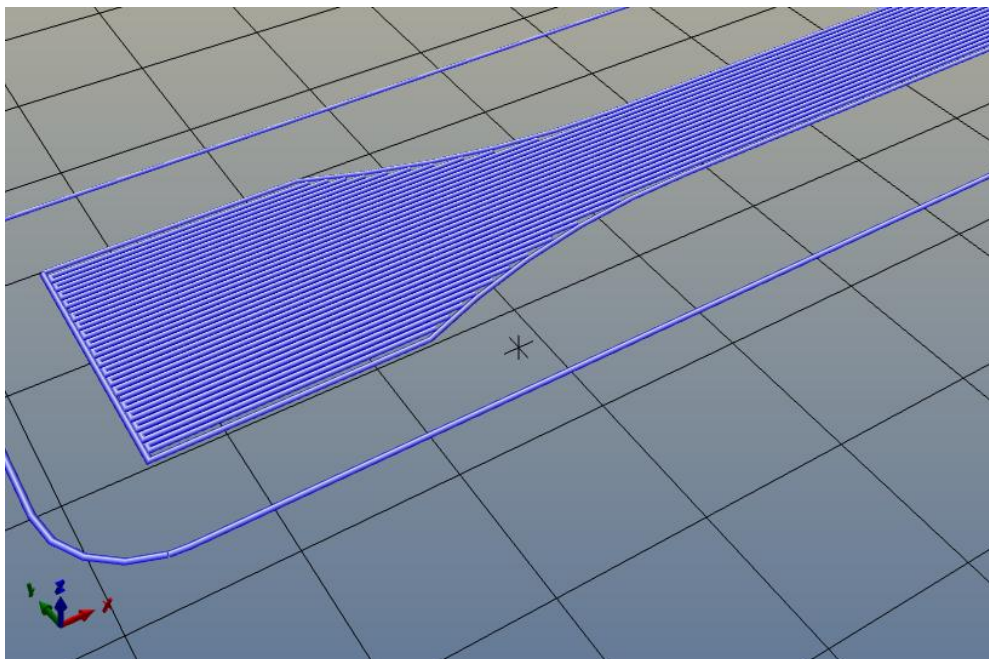
- Capas de 0º y 90º intercaladas entre sí.
- Capas a 45º intercaladas entre sí.
- Capas todas a 0º.
- Capas todas 90º.

A continuación se explica cómo cambiar las trayectorias de impresión con Repetier.

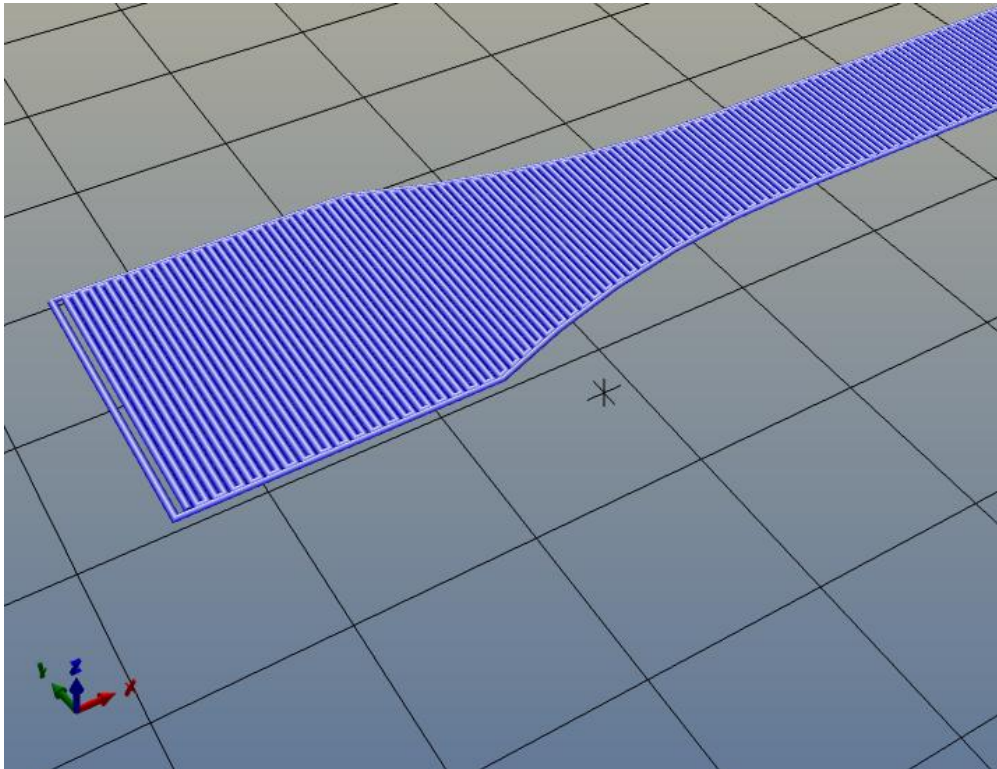
- Capas de 0º y 90º intercalados: En la configuración creada por nosotros en Sli3er en el menú principal clicamos en “ Infill ”y en las opciones que sale, en el apartado de opciones avanzadas clicamos en “Fill Angle” y ahí se pone 0º o 90º,daría igual un valor que otro, ya que lo único que cambiaría sería que empezase a imprimir o por 0º o 90º



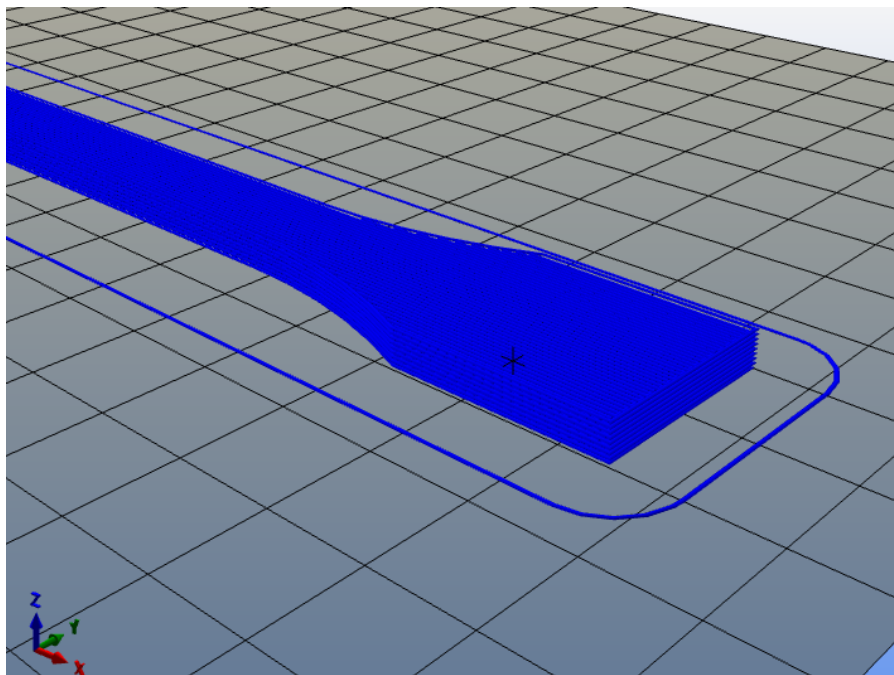
Configurar las trayectorias de impresión (0-90 intercaladas)



Capas a 0-90 intercaladas. Capa 1

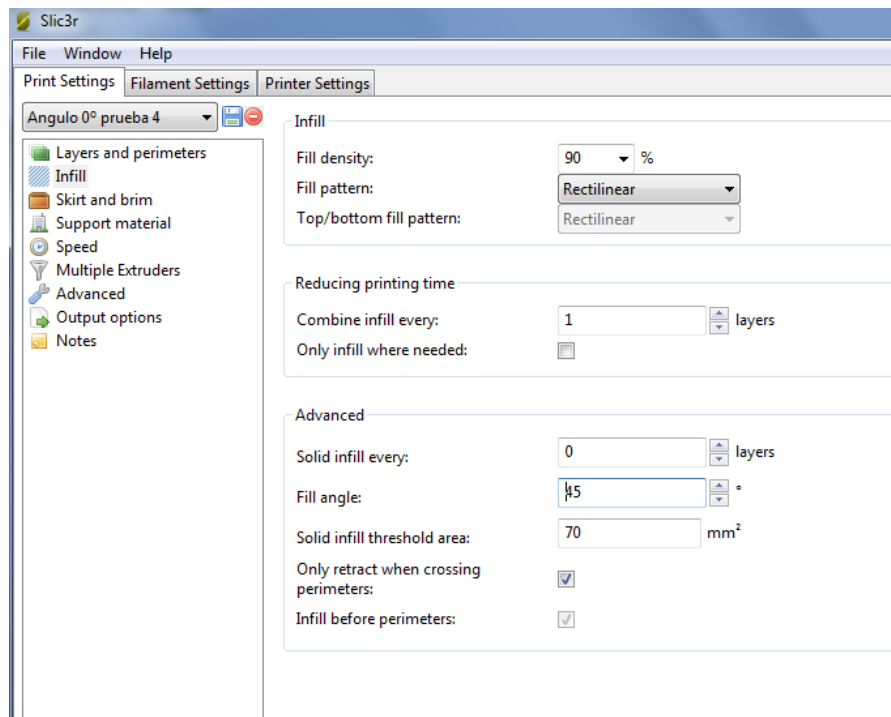


Capas a 0-90 intercaladas. Capa 2

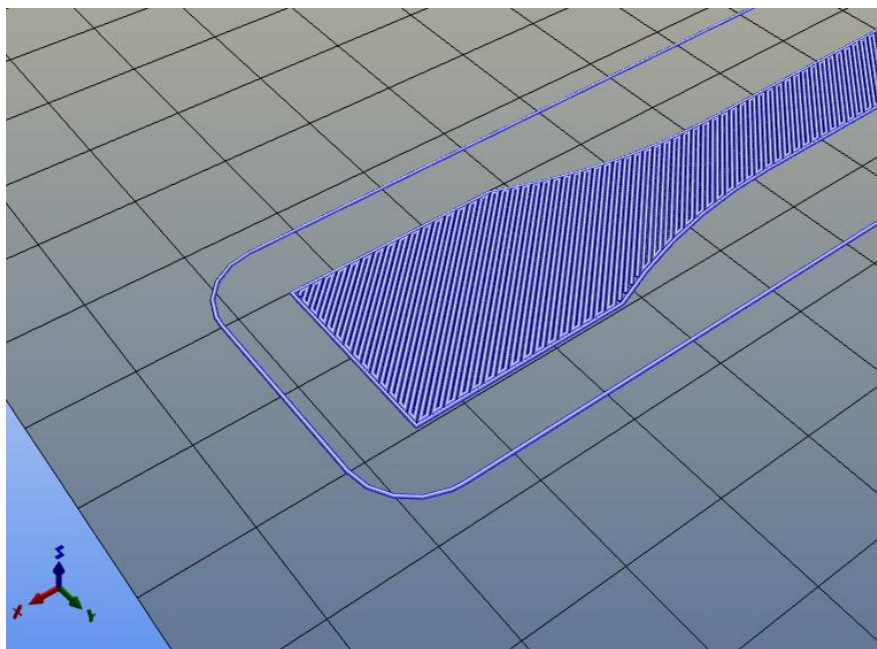


Capas a 0-90 intercaladas con todas las capas de impresión

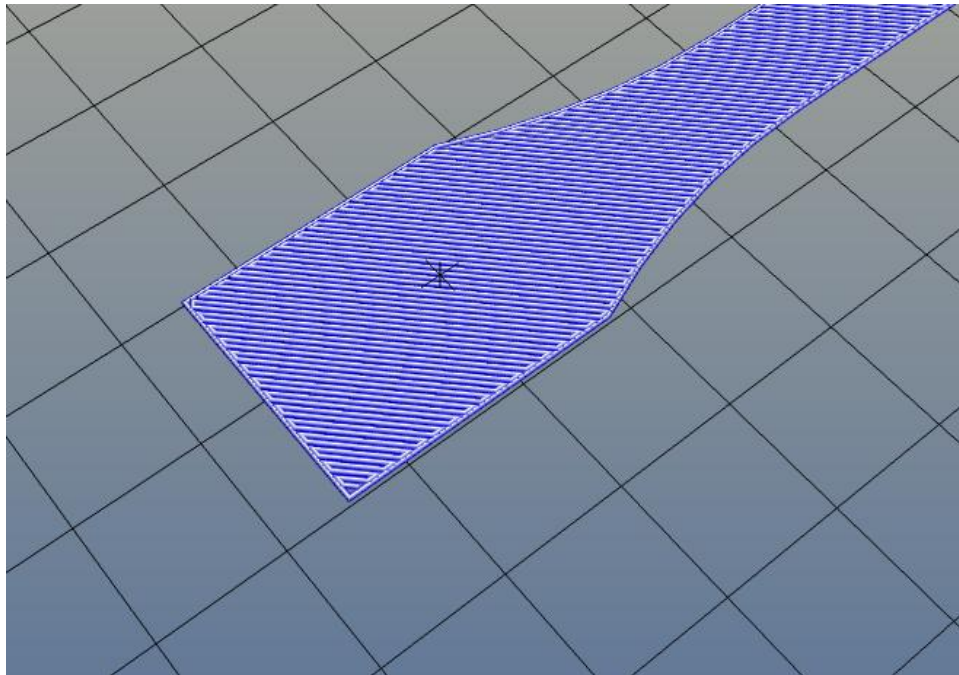
- Capas de 45º intercaladas: se cambiaria igual que la configuración anterior pero poniendo en “Fill Angle” 45º



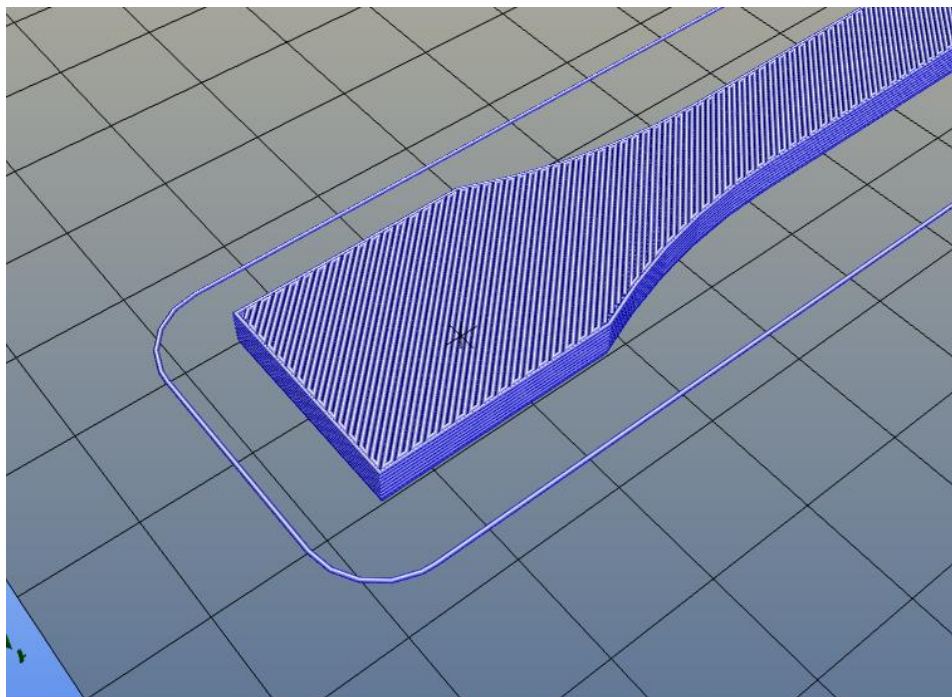
Configurar las trayectorias de impresión (45 intercaladas)



Capas 45 intercaladas. Capa 1



Capas 45 intercaladas .Capa 2



Capas 45 intercaladas todas capas



-Capas de todas trayectorias a 0º y todas a 90º:

Repetier no puede hacer este cambio automáticamente, por lo que se crea una herramienta que cambia automáticamente de capa y pone todas capas 0º o todas capas a 90º.

Esta herramienta se realiza en el punto 4 de este trabajo.

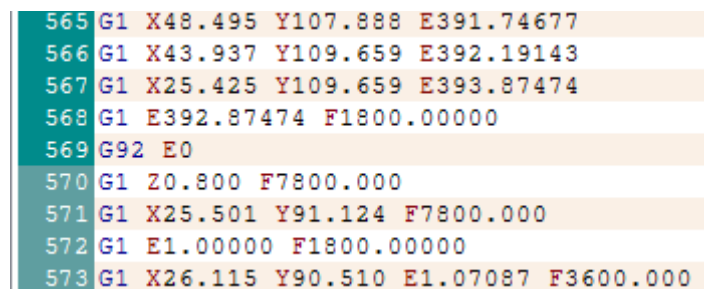
4. HERRAMIENTA PARA LA DEFINICIÓN DE TRAYECTORIAS

El objetivo de este trabajo es conseguir más trayectorias de impresión a las que cualquier programa para impresión 3D pueda dar, ya que actualmente ningún software de impresión puede dar un GCode de todas las trayectorias a 0º o todas a 90º, para ello se crea esta herramienta para poder conseguir esos GCodes.

4.1. Estudio previo a la realización de la Macro

Para poder hacer la herramienta que defina las trayectorias, que en esta caso van a ser de todas a 0º y todas a 90º, se necesita saber en el GCode de que línea de código a que otra línea de código va cada capa, ya que el planteamiento de esta herramienta va a ser coger el GCode de las trayectorias a 0º y a 90º y a partir de ese código poder sacar el de todas a 0º y todas a 90º.

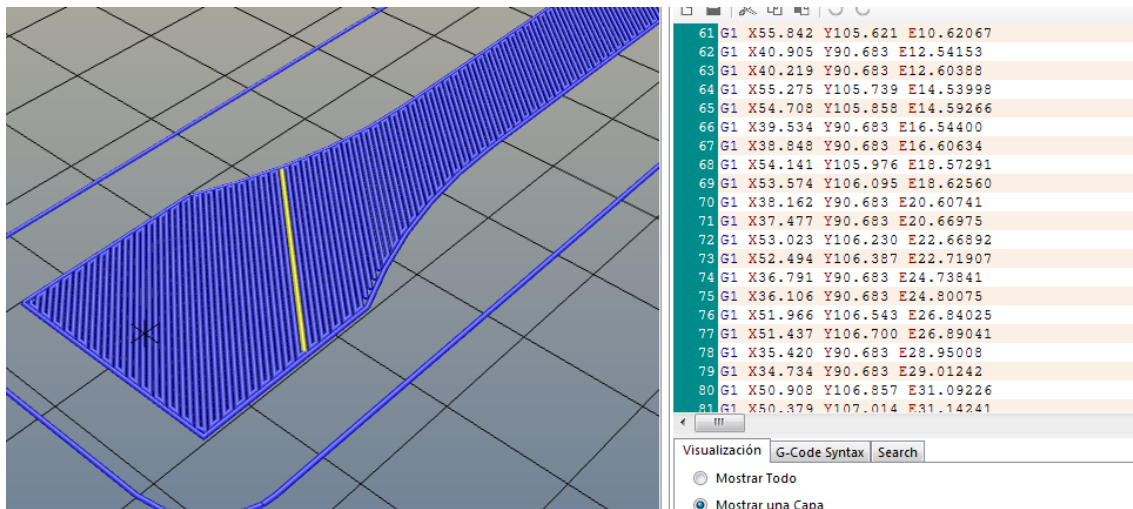
Repetier identifica en el GCode con un cambio de color en el número de línea el comienzo y el final de cada capa, lo cual ayuda mucho a identificar la capa para poder hacer la herramienta, tal y como se ve en la imagen.



```
565 G1 X48.495 Y107.888 E391.74677
566 G1 X43.937 Y109.659 E392.19143
567 G1 X25.425 Y109.659 E393.87474
568 G1 E392.87474 F1800.00000
569 G92 E0
570 G1 Z0.800 F7800.000
571 G1 X25.501 Y91.124 F7800.000
572 G1 E1.00000 F1800.00000
573 G1 X26.115 Y90.510 E1.07087 F3600.000
```

Además también se puede saber cuando comienza y cuando termina una capa ya que el final de cada capa termina siempre en G92 E0 y el principio de una capa siempre empieza con G1 y una cota Z con un número, que ese número es lo que sube el cabezal para poder hacer la siguiente capa.

Además si con todos estos datos se tiene alguna duda, también se puede saber lo que hace el GCode en cada momento clicando en una línea de código y mirando en la visualización 3D ya que se pondrá en color amarillo la zona que pertenece a esa línea de GCode como se ve en la siguiente imagen:



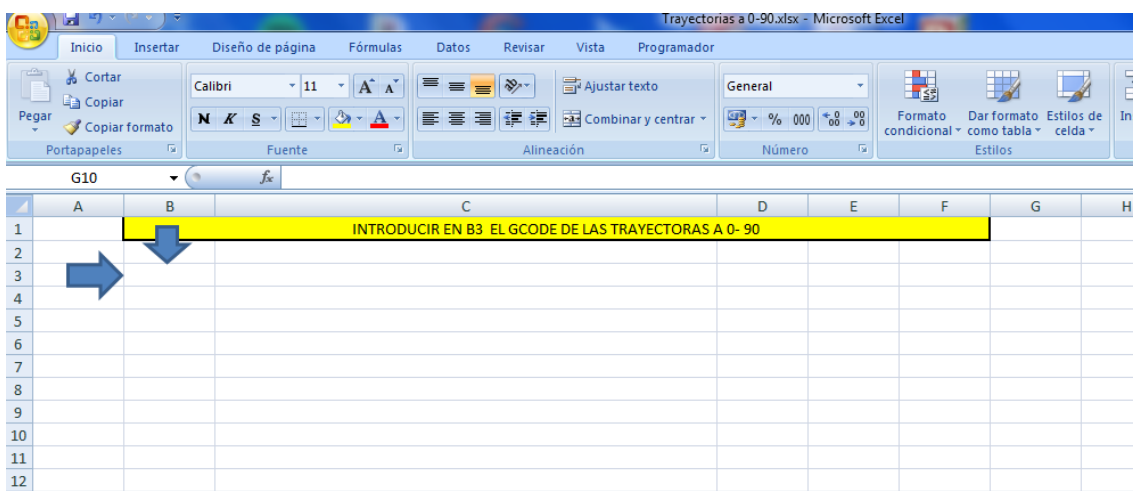
Visualización en Repetier de una de las líneas de código

En este caso, se ha clicado sobre la línea de código y 74 y en la visualización 3D de las trayectorias se pone de color amarillo la trayectoria a la que pertenece ese código.

4.2. Macro

Para hacer una herramienta que a partir del GCode de las trayectorias a 0º y a 90º saque un GCode de todas a 0º y todas a 90º se usa una macro en Excel ya que con este software se puede hacer fácilmente.

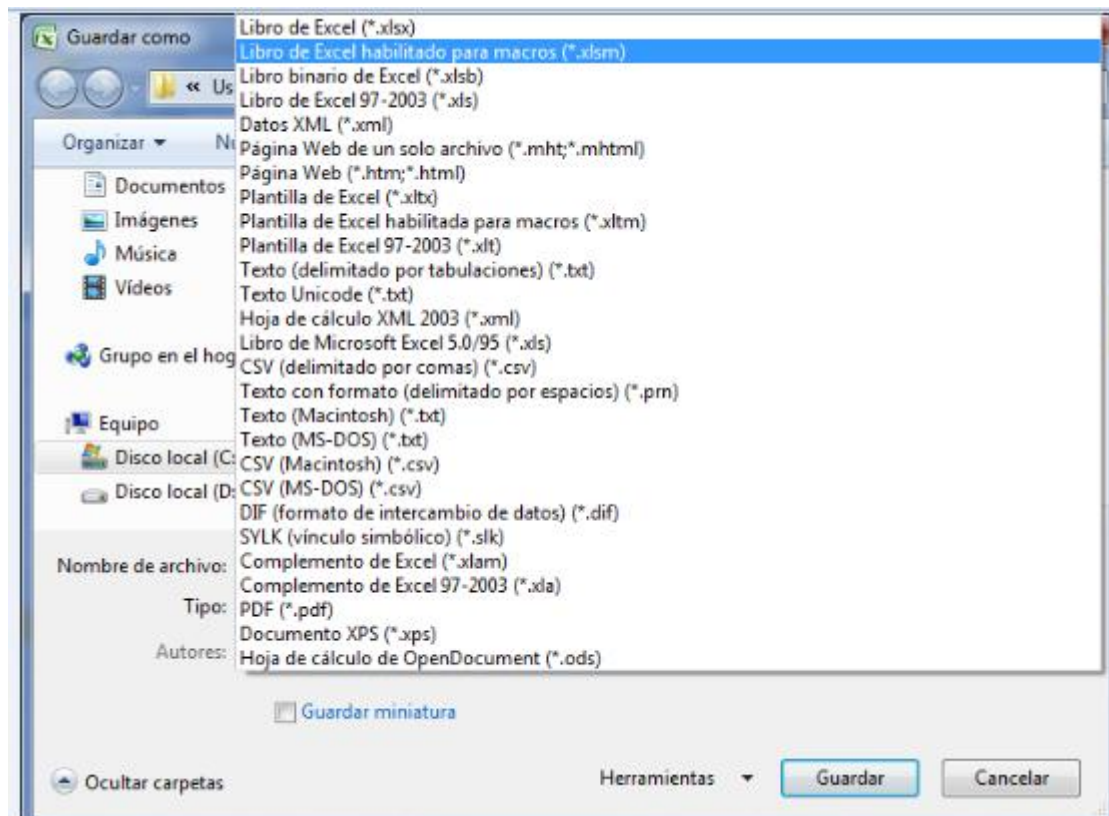
En primer lugar se crea una hoja Excel en al cual siempre va a ser donde se va a pegar el GCode de las trayectorias a 0º y 90º intercalados. En este caso para que funcione bien la macro, el GCode debe de introducirse en la casilla B3.



Introducción de datos en la Macro de Excel

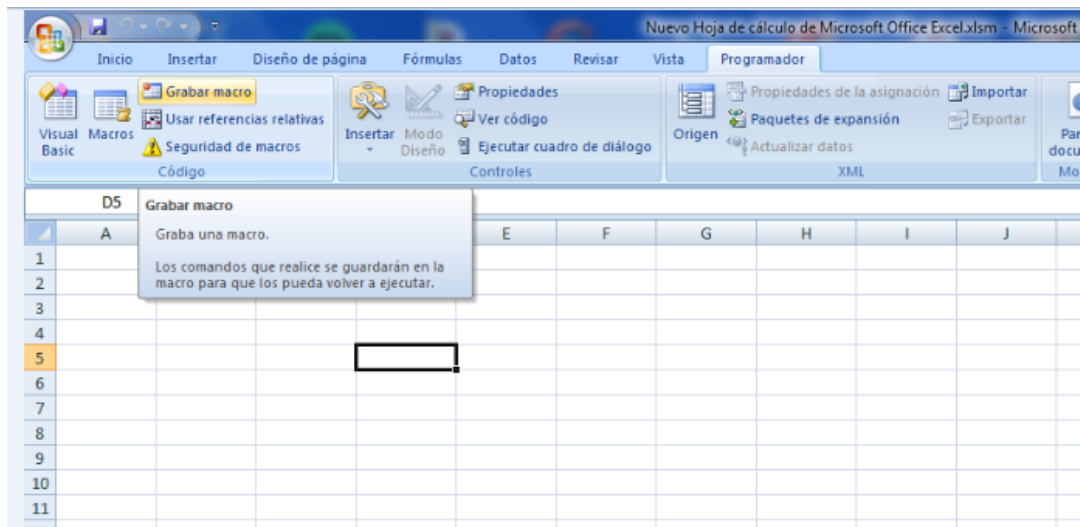
Teniendo en una hoja Excel las trayectorias de 0-90 ya se puede programar la macro para que saque automáticamente el código para ello se procede de la siguiente manera.

En primer lugar se crea una nueva hoja Excel y se guarda como una hoja Excel habilitada para macros.



Guardado de una hoja Excel

El siguiente paso es grabar una macro, para ello se va al menú de Programador y se clicca en grabar macro.



Inicio grabación de la Macro

Al apretar el botón, le damos nombre a la macro y todo lo que hagamos se grabará.

Al hacer un estudio del GCode de las trayectorias a 0-90 intercalados como se ha explicado en el punto 4.1 de este trabajo, ya se sabe de qué línea a qué línea de código va cada capa de impresión, por ello ya se puede programar la macro.

Para hacer la macro de todas las trayectorias a 0º se procede de la siguiente manera:

Primero se va a Repetier y se ve en el código del GCode 0-90 cuanto sube cada capa, es decir, la cota Z.

```
201 G1 X25.425 Y109.659 E31.90223
202 G1 E30.90223 F1800.00000
203 G92 E0
204 G1 Z0.800 F7800.000
205 G1 X26.016 Y90.474 F7800.000
206 G1 E1.00000 F1800.00000
```

Cambio de cota de la primera capa a la segunda

```
851 G1 X25.325 Y109.759 E26.71116
852 G1 E25.71116 F1800.00000
853 G92 E0
854 G1 Z1.250 F7800.000
855 G1 X25.483 Y109.019 F7800.000
856 G1 E1.00000 F1800.00000
```

Cambio de cota de la segunda a la tercera

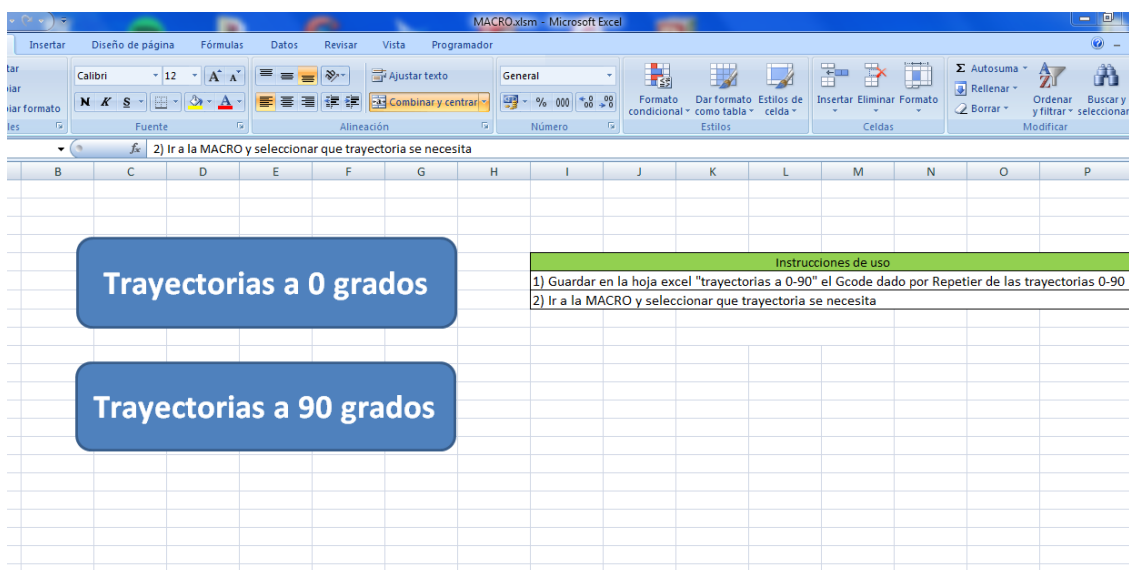
Así sucesivamente se obtiene la cota Z de cada capa de impresión, ya que este valor es muy importante para que después todas las trayectorias estén correctamente situadas.

Al hacer la macro de todas a 0º lo que se hace es, copiar la primera capa del GCode de todas a 0-90 y la segunda capa es exactamente igual que la primera pero modificando la cota Z, que será la cota Z de la capa 2 del GCode de 0-90 y así sucesivamente, es decir, las capas a 0º se dejan igual que están, y las capas a 90 se cambian con la primera capa y se cambia la cota, así es como se consigue que todas las trayectorias estén a 0º

Para hacer la macro de todas a 90º, se actúa de igual manera que para las de todas a 0º pero cambiándoles la cota Z a las de 0º y las capas que ya estén a 90º se dejan tal y como están.

Una vez que se han hecho estos cambios se le da a para la macro, y ya está lista para usarse.

Para dejar la macro más estética, se hacen unos botones, que automáticamente ejecutan la macro.



Visualización de la macro

5. IMPRESIÓN EN 3D Y ENSAYOS MECÁNICOS

5.1. Ajustes de la impresora 3D

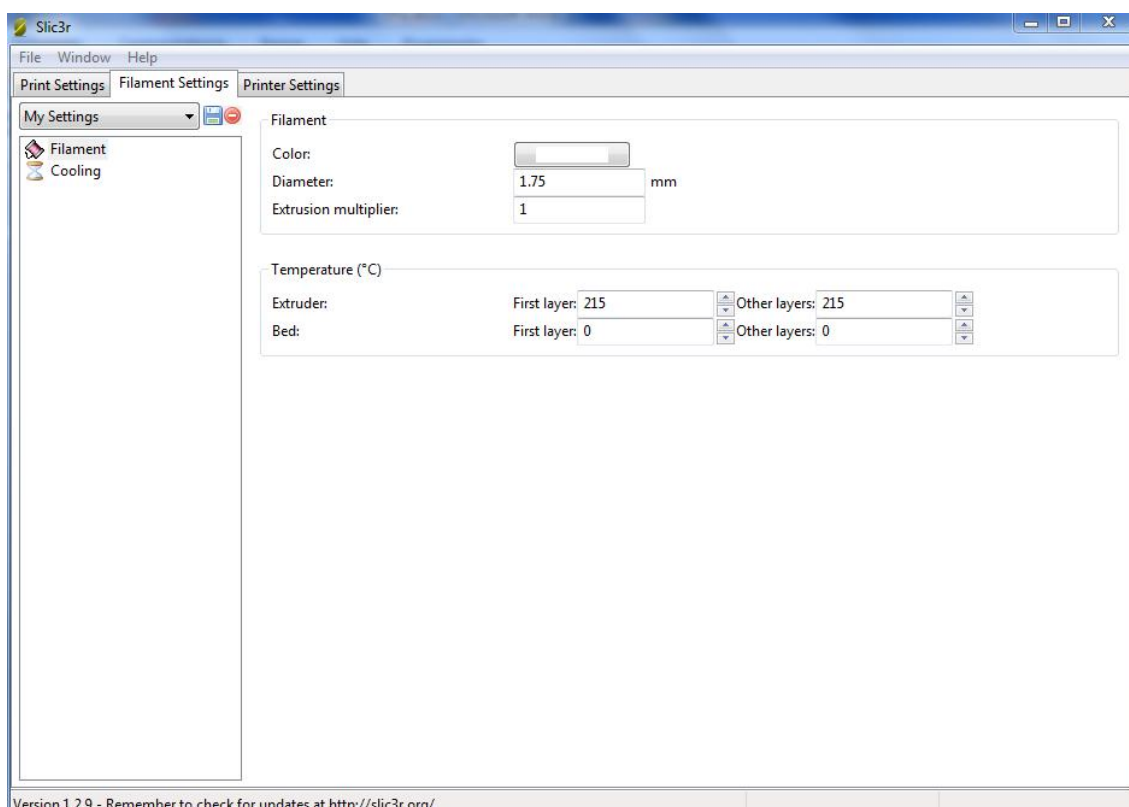
Una vez introducida la probeta en el programa Repetier y habiendo hecho el Slicer con la trayectoria deseada de la probeta tal y como se explica en el punto 3.2.3 y 3.2.4 de este trabajo, el siguiente paso es poner correctamente la configuración de impresión 3D para que imprima correctamente la probeta.

Dentro del menú de la configuración, arriba hay 3 pestañas(Print Settings, Filament Settings y Printer Settings).

En la pestaña Print Settings se modifica las trayectorias de impresión, espesor de capa, densidad de llenado ,etc ya explicado en los puntos 3.3.3 y 3.2.4 de este trabajo.

En la pestaña Filament Settings y Printer Settings va a ser donde se va modificar los parámetros para imprimir correctamente.

Este es el aspecto de la ventana Filament Settings:

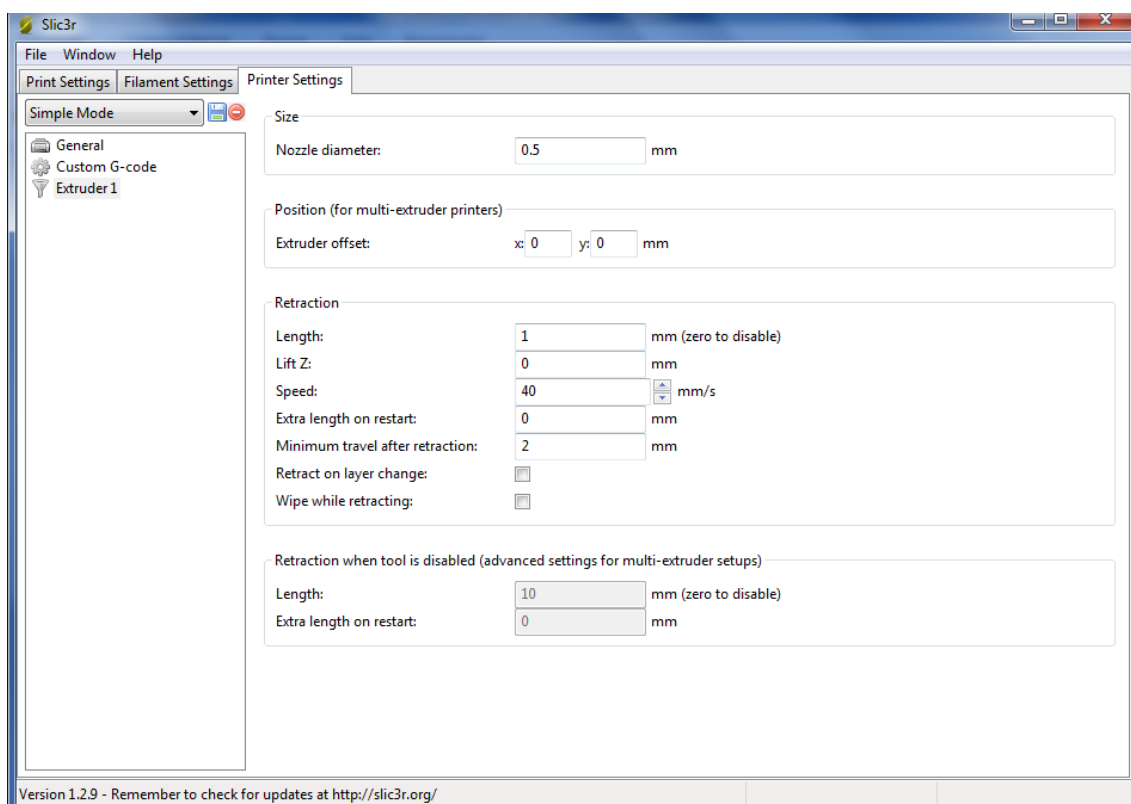


Ajustes de parámetros de impresión

En Diameter pondremos el diámetro del hilo de PLA, ese dato lo da el fabricante en el royo de hilo, en este caso es BQ y el diámetro es de 1,75mm.

En el apartado de temperatura se tiene que poner la temperatura de extrusión para la primera capa y para otras capas, en este caso la temperatura recomendada para el PLA es de 215 °C, los demás datos se dejan como viene por defecto.

Ahora el siguiente paso es configurar las opciones de impresora “Printer Settings” para ello vamos a la siguiente pantalla:



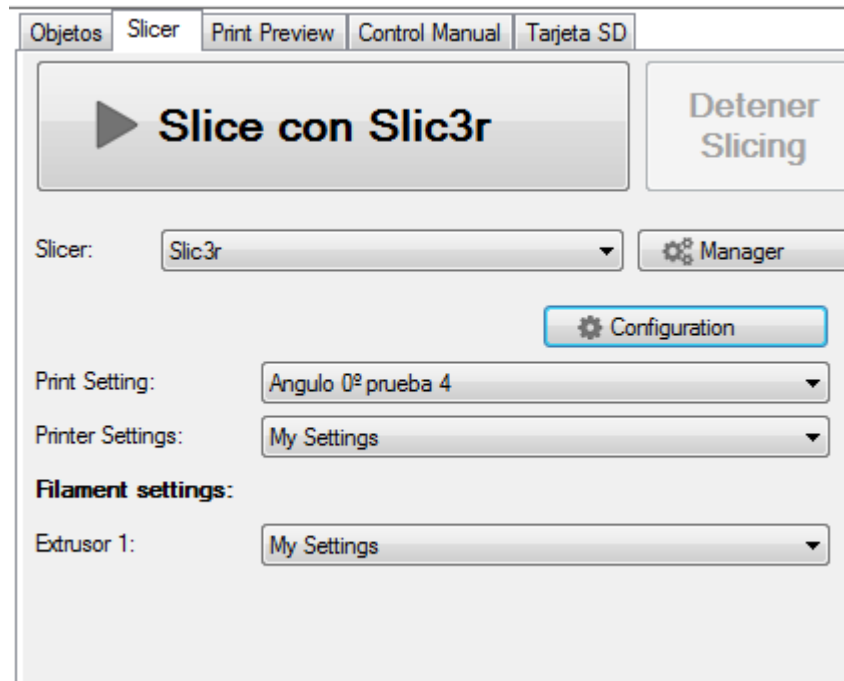
Ajuste de parámetros de la impresora 3D

En esta ventana el único dato que hay que configurar es el “Nozzle Diameter” que en el caso de la impresora utilizada es de 0.5 mm

Una vez que todas las pestañas del Slic3r están configuradas, se da a guardar con el nombre que se le quiera dar.

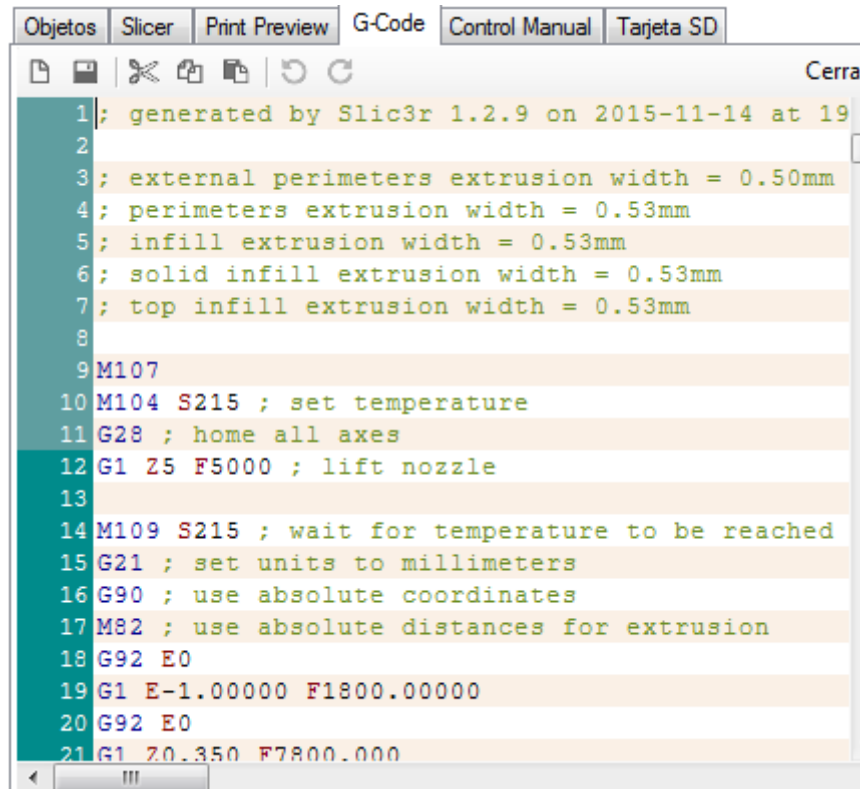
En este caso las opciones de impresión están guardadas como “Ángulo 0º prueba 4”, las opciones de filamento están guardados como “My Settings” y las opciones de la impresora están guardadas como “My Settings”.

Al cerrar la ventana hay que dar a Slice con Slic3r pero esta vez poniendo las opciones con las que hemos hecho un perfil de impresión para que el GCode final este correcto.



Menú de Slice

Cuando se le da a Slice, para ver el GCode final que va a ser el que le metamos a la impresora 3D, aparece una nueva pestaña que se llama GCode .



```
1; generated by Slic3r 1.2.9 on 2015-11-14 at 19
2
3; external perimeters extrusion width = 0.50mm
4; perimeters extrusion width = 0.53mm
5; infill extrusion width = 0.53mm
6; solid infill extrusion width = 0.53mm
7; top infill extrusion width = 0.53mm
8
9M107
10M104 S215 ; set temperature
11G28 ; home all axes
12G1 Z5 F5000 ; lift nozzle
13
14M109 S215 ; wait for temperature to be reached
15G21 ; set units to millimeters
16G90 ; use absolute coordinates
17M82 ; use absolute distances for extrusion
18G92 E0
19G1 E-1.00000 F1800.00000
20G92 E0
21G1 Z0.350 F7800.000
```

Líneas de código

Para finalizar, le damos al icono de guardar y ya tenemos el archivo .gcode para meter a la impresora 3D

5.2. Impresión de la probeta

Una vez que tenemos el GCode ya se puede imprimir en la impresora 3D, lo primero que hay que hacer es pasar a una tarjeta SD el GCode generado por Repetier e introducirlo al sistema de la impresora.

Una vez metido ese GCode se inserta la tarjeta SD en la impresora y aparece el siguiente menú en el display de la impresora.



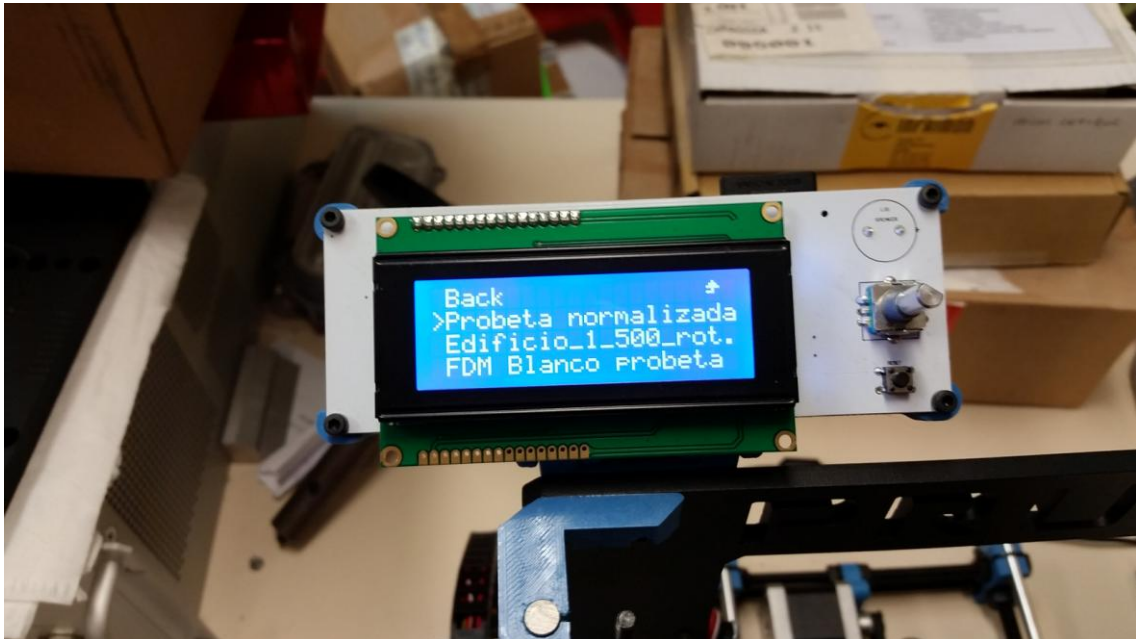
Pantalla inicio impresora 3D

Para hacer la impresión hay que seleccionar desde el display el gcode de la probeta, para ello, el botón de la derecha de la imagen lo se aprieta hacia abajo y aparece el siguiente menú



Menú de impresión

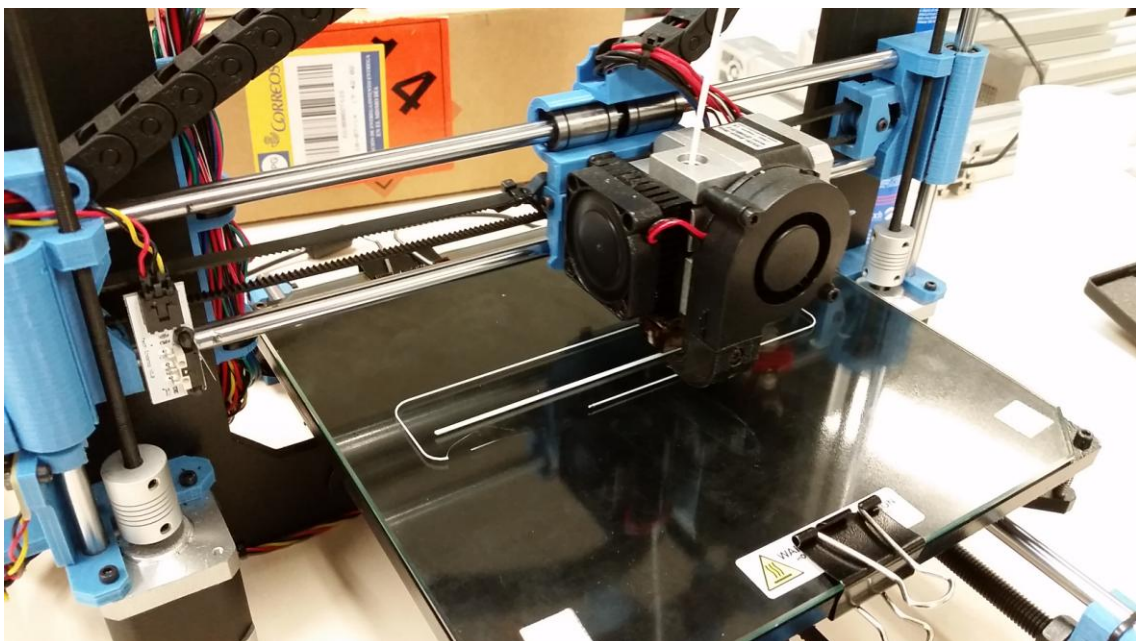
Con el botón giratorio, seleccionamos la opción de Print for SD y volvemos a apretar el botón hacia abajo para seleccionar. Aparece el siguiente menú, en el que aparecen todos los archivos .gcode que hay dentro de la tarjeta SD.



Selección del archivo a imprimir

Con el botón giratorio seleccionamos el archivo .gcode que se quiere imprimir que por lo general, el último archivo que hayamos metido será el primero en aparecer y para finalizar, se aprieta el botón hacia abajo.

Realizados estos pasos la impresora se pondrá a calentar el cabezal a la temperatura que se le haya puesto y empezara la impresión.



Comienzo de la impresión

5.3. Ensayos Mecánicos

Se han realizado ensayos de tracción y de flexión a las probetas para ver cuál era su comportamiento, este ensayo se ha realizado con una máquina de ensayos con una célula de carga de 10 KN, ubicada en el departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Zaragoza.



Máquina de ensayos

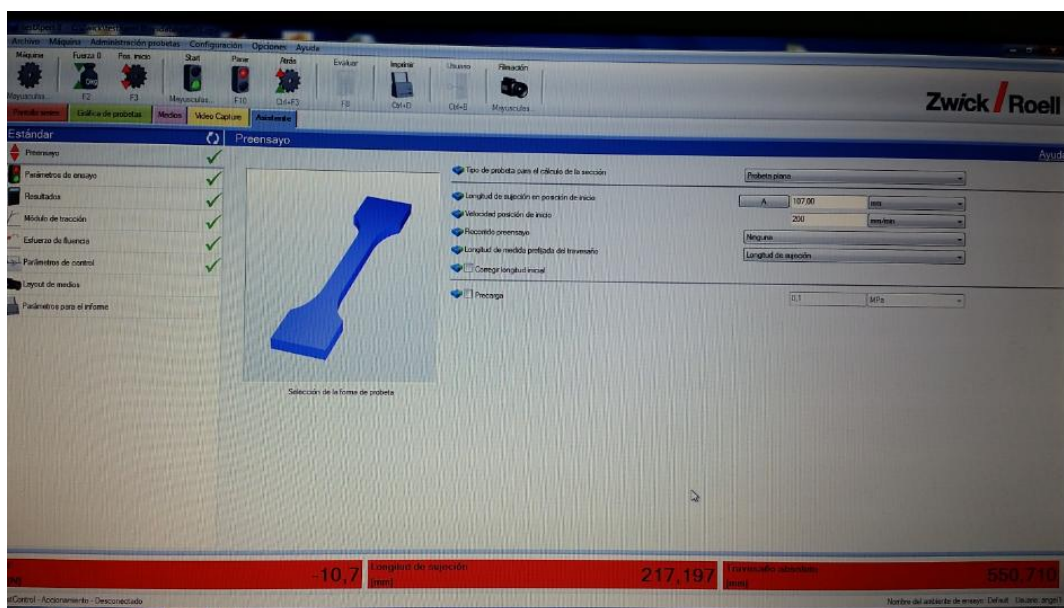
5.3.1. Ensayo de tracción

Para la determinación de las propiedades de tracción se ha usado la norma UNE-EN ISO 527-1.

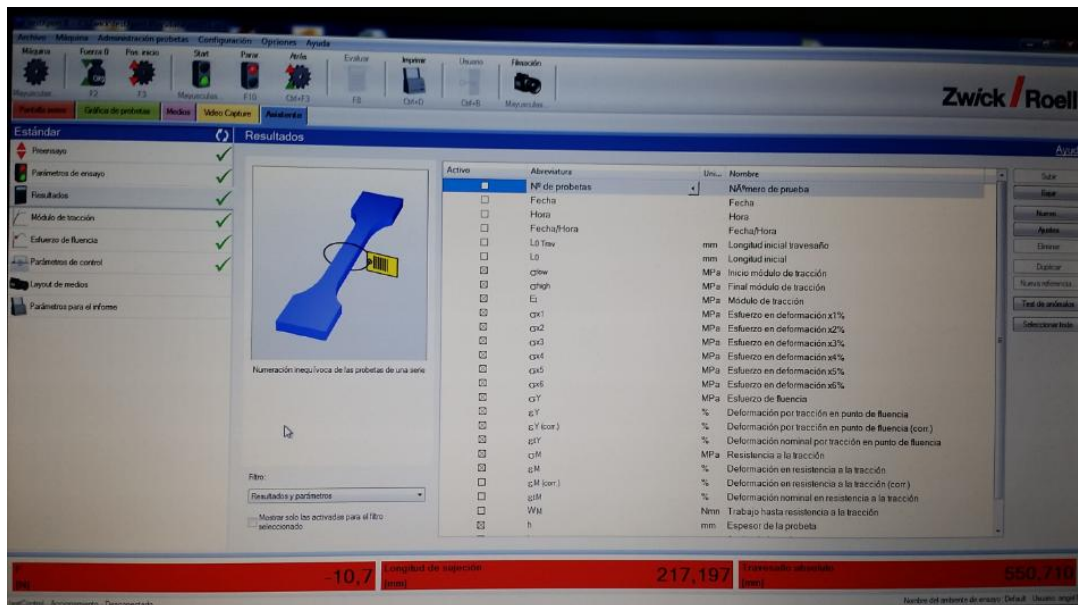
Se han realizado 5 ensayos a cada una de las probetas impresas en las diferentes trayectorias de impresión.

Para realizar el ensayo, lo primero que hay que hacer es enchufar la máquina y abrir el programa informático que controla la máquina, al abrir el software hay que elegir el tipo de material y tipo de ensayo, en este caso material: polímeros y ensayo: tracción.

Al seleccionar el tipo de ensayo hay que rellenar los parámetros de ensayo, en la ventana que pone Asistente se rellena la distancia entre mordazas, que será medida con una calibre, los resultados que se quiere sacar en el informe, la velocidad de ensayo, que en este caso será de 1mm/min, las medidas de la probeta que si se ha hecho conforme a la norma ya sale de manera predeterminada. En la siguiente imagen se puede ver las pantallas de configuración del software de ensayos.



Configuración del ensayo a tracción



Configuración de los datos del informe para e ensayo a tracción

Una vez puestos los parámetros de ensayo en el software se colocan en las mordazas la probeta y se le da al botón verde de Start que aparece en la pantalla principal del software.



Colocación probetas en máquina de ensayos



Los parámetros que establece la norma que hay que calcular mediante la máquina de ensayos son: la fuerza máxima, el límite elástico a tracción y la resistencia a la tracción.

Los resultados a los ensayos han sido los siguientes:

PROBETAS 0-90	Fuerza máxima (N)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Modulo de tracción (Mpa)
1	2064	51.6	761
2	2124	53.1	833
3	2020	50.5	813
4	2080	52	707
5	1968	49.2	697
PROMEDIO	2051.2	51.28	762.2
DESVIACIÓN	59.56	1.49	61.02

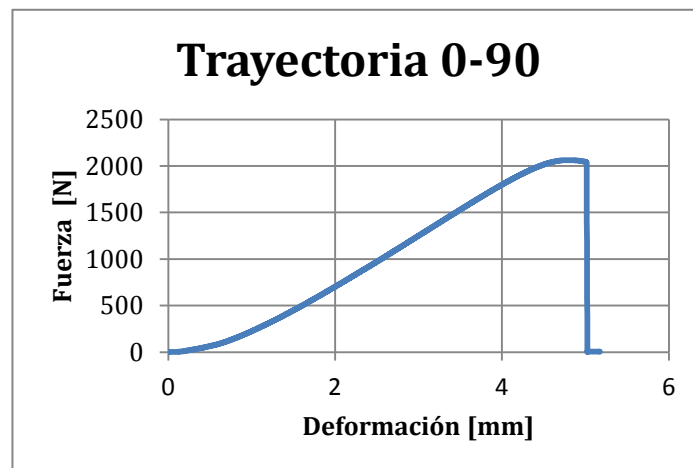
PROBETAS +45 -45	Fuerza rotura (N)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Modulo de tracción (Mpa)
1	1984	49.6	676
2	1644	41.1	649
3	1944	48.6	958
4	2036	50.9	757
5	2096	52.4	840
PROMEDIO	1940.8	48.52	776
DESVIACIÓN	59.56	1.49	61.02

PROBETAS 0	Fuerza rotura (N)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Modulo de tracción (Mpa)
1	1972	49.3	475
2	1952	48.8	682
3	1836	45.9	422
4	1936	48.4	891
5	1924	48.1	823
PROMEDIO	1924	48.1	658.6
DESVIACIÓN	175.44	4.39	126.20

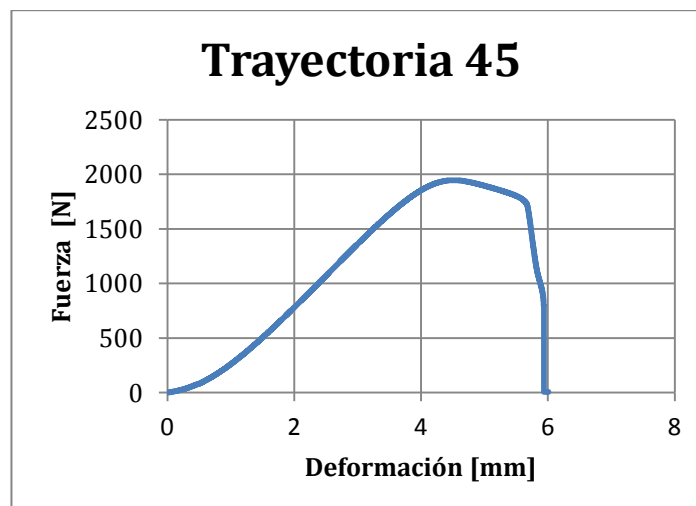
PROBETAS 90	Fuerza rotura (N)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Modulo de tracción (Mpa)
1	1176	29.4	412
2	1176	29.4	711
3	1176	29.4	1120
4	1128	28.2	332
5	1036	25.9	862
PROMEDIO	1138.4	28.46	687.4
DESVIACIÓN	52.38	1.31	206.93

El software saca en el informe una gráfica que se puede elegir los valores que se quieren representar, en este caso se elige la fuerza máxima en Newton y la deformación en mm.

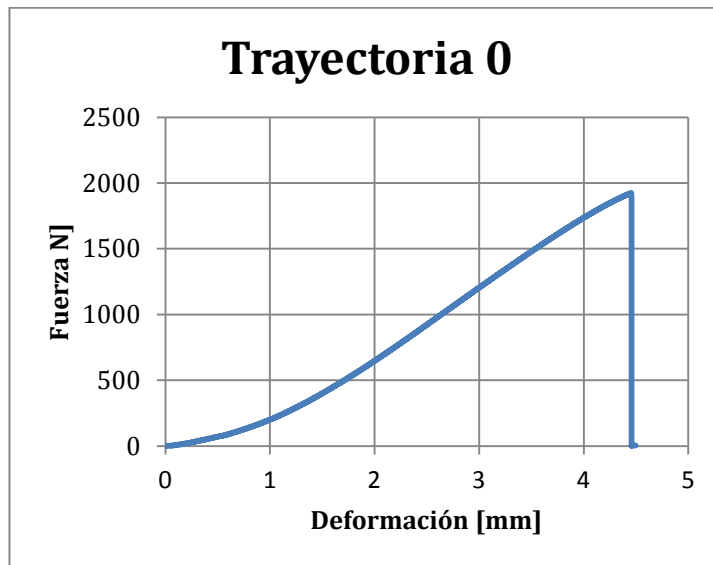
A continuación se ponen la gráficas con la fuerza media y la deformación media para cada una de las trayectorias de impresión ensalladas.



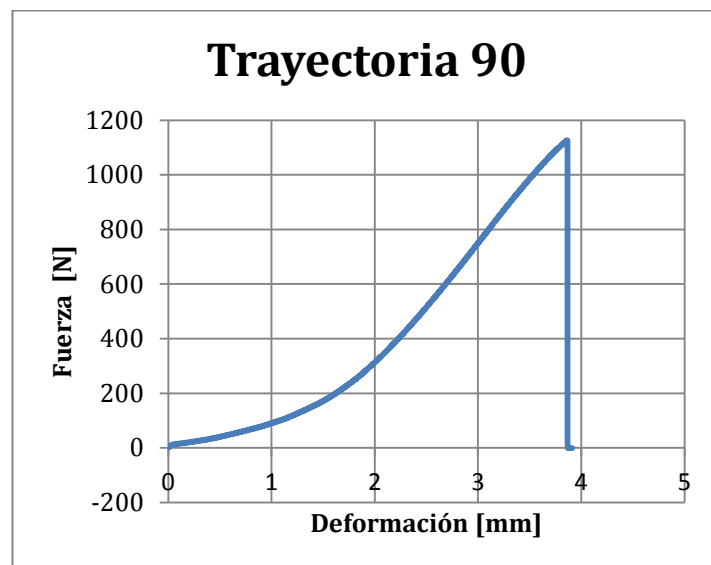
Gráfica Fuerza Deformación para 0-90



Gráfica Fuerza Deformación para +45 -45



Gráfica Fuerza Deformación para 0



Gráfica Fuerza Deformación para 0-90

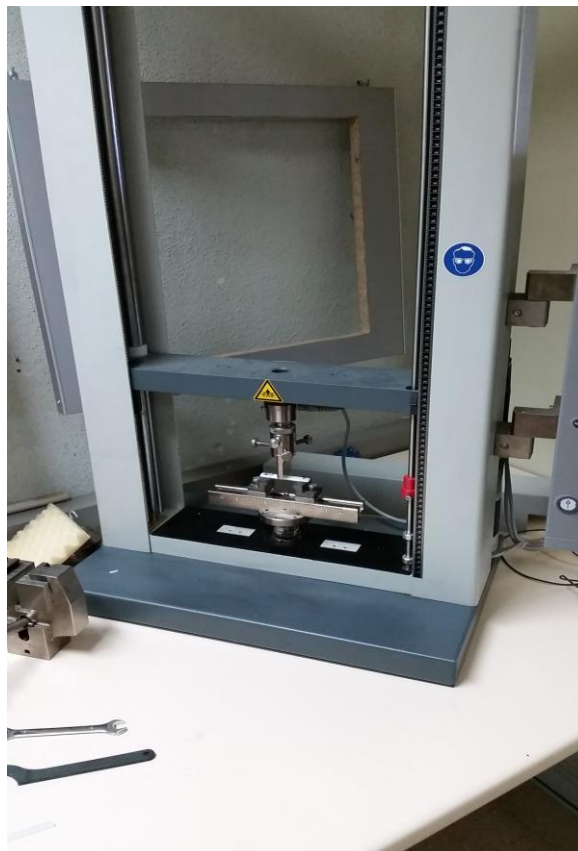
5.3.2. Ensayo de flexión

Para la determinación de las propiedades de tracción se ha usado la norma UNE-EN ISO 178:2011

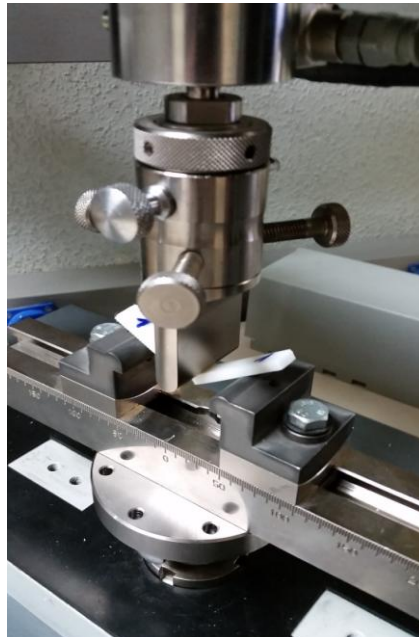
Se han realizado 5 ensayos a cada una de las probetas impresas en las diferentes trayectorias de impresión.

En las probetas que tienen todas las trayectorias a 0° hubo un error de impresión 3D ya que la impresora no leía bien el código, siendo que estaba hecho con los mismos parámetros que las demás probetas, para solucionarlo, se ensayaron probetas hechas igual pero lo único que cambiaban eran las dimensiones, eran más pequeñas, la sección en vez de ser de 40 mm², es de 15 mm², esto no influye en el ensayo ya que en el programa informático que tiene la máquina de ensayos, se introduce la sección y calcula todos los parámetros de ensayo.

Los datos que hay que introducir al programa informático para realizar el ensayo, son los mismos que para el ensayo de tracción pero en este caso la velocidad de ensayos será de 5mm/min.



Útiles para el ensayo de flexión



Probeta rompiendo por flexión

Los parámetros que establece la norma que hay que calcular mediante la máquina de ensayos son: la fuerza máxima, resistencia a la flexión y la deformación a la flexión.

Los resultados a los ensayos han sido los siguientes:

PROBETAS 0-90	Fuerza máxima (N)	Resistencia a la Flexión (Mpa)	Deformación a la Flexión (%)
1	180	68.3	7.3
2	180	68.3	4.5
3	200	76.3	6.4
4	170	64	3.6
5	185	68.8	5.8
PROMEDIO	183	69.14	5.52
DESVIACIÓN	10.95	4.45	1.48

PROBETAS +45 -45	Fuerza máxima (N)	Resistencia a la Flexión (Mpa)	Deformación a la Flexión (%)
1	210	79	8.5
2	210	78.7	9.5
3	215	80.9	9.7
4	210	78.5	9.2
5	205	77.9	8.8



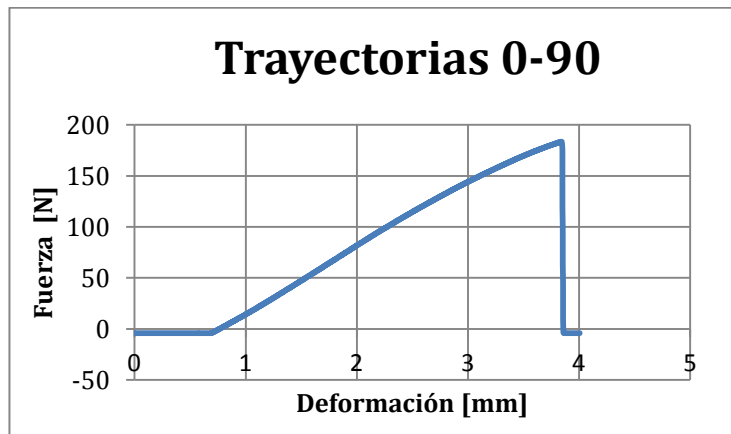
PROMEDIO	210	79	9.14
DESVIACIÓN	3.54	1.14	0.49

PROBETAS 0	Fuerza máxima (N)	Resistencia a la Flexión (Mpa)	Deformación a la Flexión (%)
1	205	93.8	5.1
2	60	96.9	5.7
3	58	92.8	4.8
4	58	92.4	4.4
5	58	92.1	4.8
PROMEDIO	87.8	93.6	4.96
DESVIACIÓN	65.52	1.95	0.48

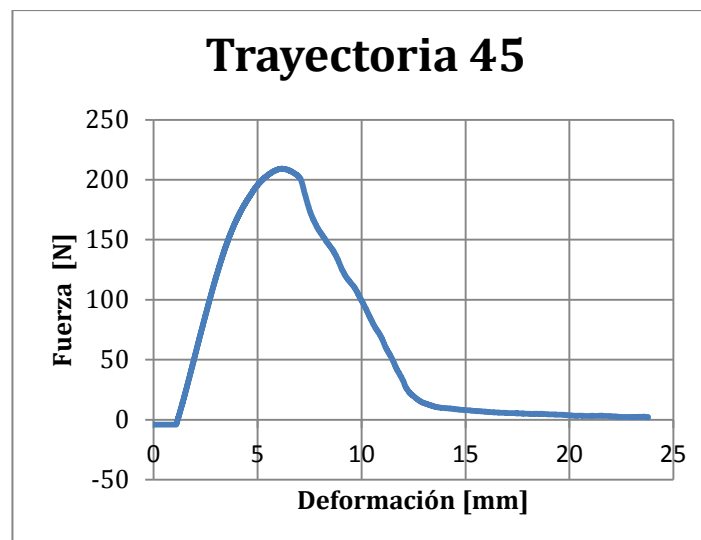
PROBETAS 90	Fuerza máxima (N)	Resistencia a la Flexión (Mpa)	Deformación a la Flexión (%)
1	195	85.2	4.4
2	200	92.4	4.4
3	205	94.2	4.1
4	190	82.5	3.9
5	185	83.6	4.2
PROMEDIO	195	87.58	4.2
DESVIACIÓN	7.91	5.35	0.21

El software saca en el informe una gráfica que se puede elegir los valores que se quieren representar, en este caso se elige la fuerza máxima en Newton y la deformación en mm.

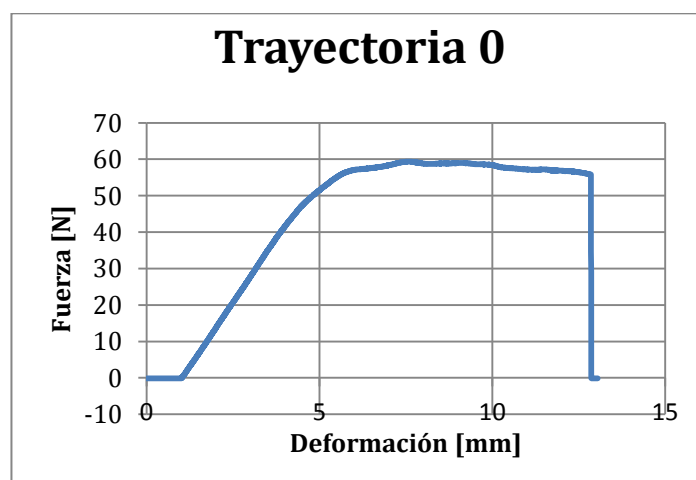
A continuación se ponen la gráficas con la fuerza media y la deformación media para cada una de las trayectorias de impresión ensalladas.



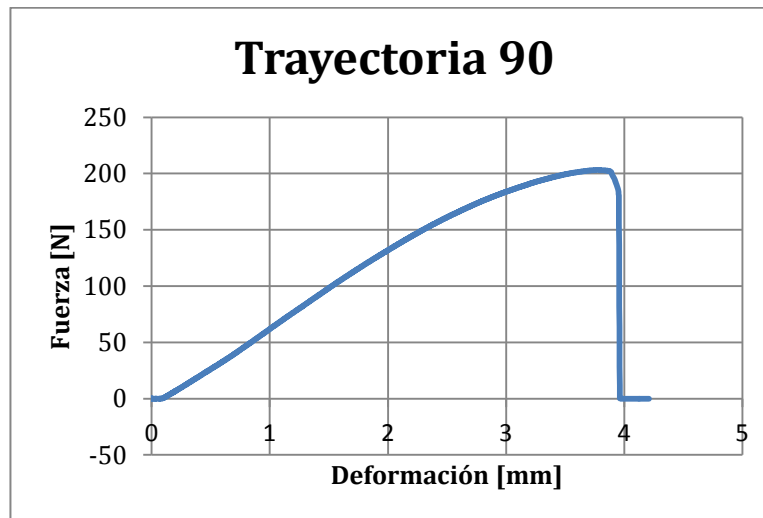
Gráfica Fuerza Deformación para 0-90



Gráfica Fuerza Deformación para +45 -45



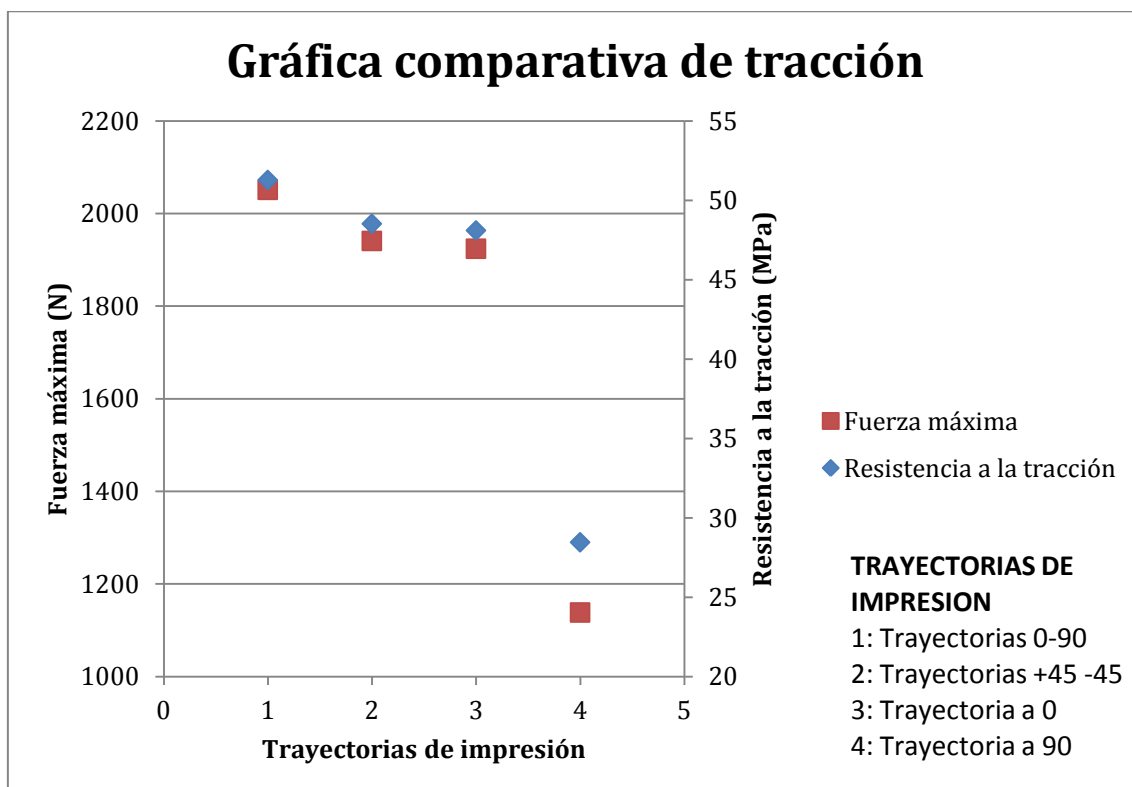
Gráfica Fuerza Deformación para 0



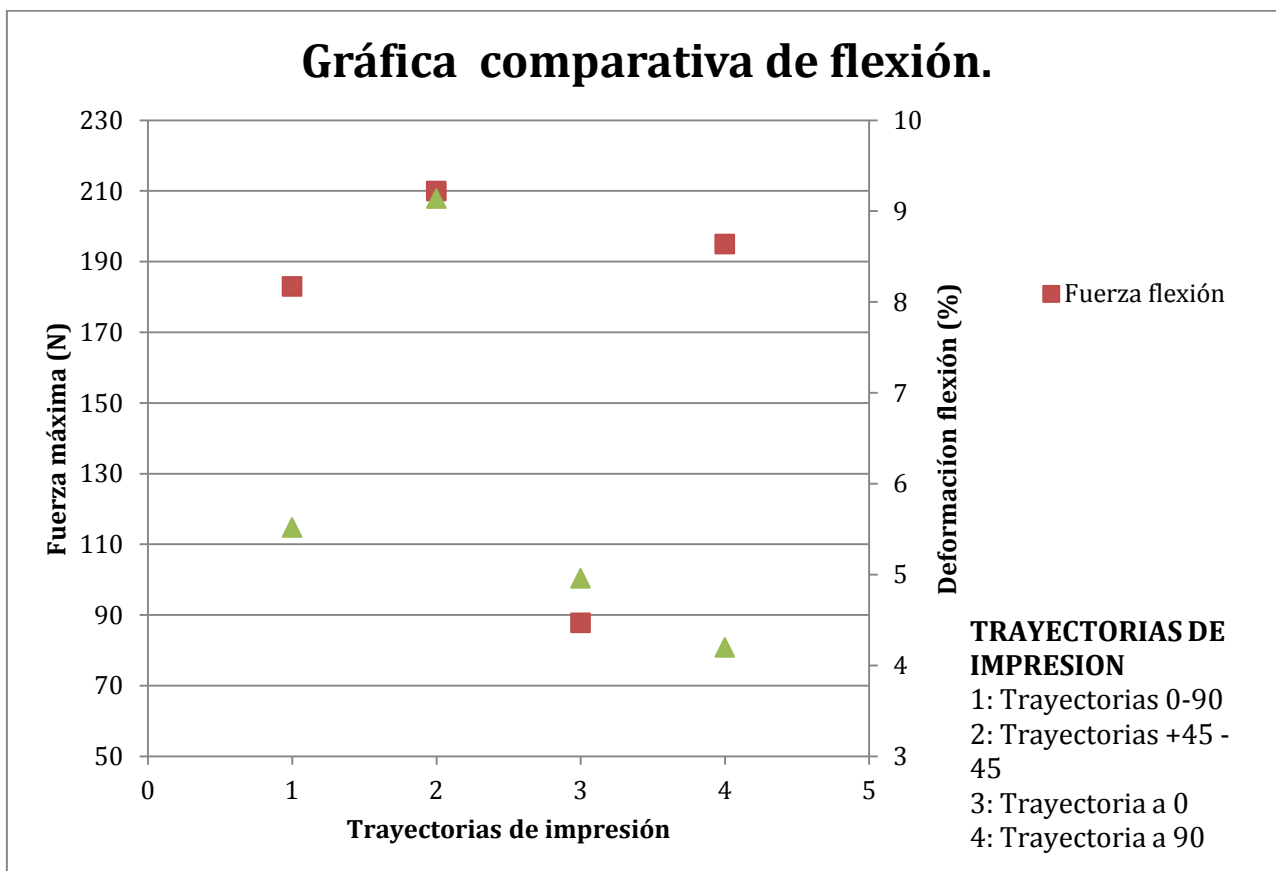
Gráfica Fuerza Deformación para 90

5.3.2. Conclusión de los ensayos mecánicos

Una vez realizados los ensayos y con las gráficas de los valores medios de fuerza y deformación, se pueden sacar conclusiones de que trayectoria trabaja mejor a tracción y cual a flexión.



Gráfica comparativa de tracción



Gráfica comparativa de flexión

Para tracción, sin realizar ningún ensayo se supone que las probetas que mejor tienen que aguantar son las de todas las trayectorias impresas a 0º ya que todas las fibras están orientadas en la dirección del esfuerzo, según los resultados de los ensayos, las probetas que mejor han aguantado han sido las probetas con trayectorias a 0º - 90º intercalados, esto puede ser debido a que las trayectorias de 0-90 son trayectorias hechas por Repetier y el ajuste de las capas es mejor que las trayectorias a 0º ya que el GCode está hecho "a mano".

Para flexión, sin realizar ningún ensayo se supone que las probetas que mejor tienen que aguantar son las de todas las trayectorias impresas a 0º, pero según los ensayos realizados las que mejor resultado se ha obtenido ha sido la probeta de +45º -45º y esto también ha podido ser debido al mismo motivo que en el ensayo de tracción.

Ya que los resultados no han sido los esperados, se mide la porosidad del PLA de las probetas para ello se coge un trozo de probeta, en este caso, una probeta de flexión ya que se puede medir fácilmente, y se calcula el volumen:

$$10,55 \text{ mm} \times 4,30 \text{ mm} \times 80 = 3.63 \text{ cm}^3$$

El siguiente paso es medir el peso de la probeta en una balanza de precisión:



Balanza usada para medir la porosidad

El peso que da la probeta es de 3.93 g

Si se divide el peso entre el volumen se obtiene la densidad que en este caso sale de 1.082 g/cm^3

Se calcula el factor de compactación que es la densidad que se ha sacado de la probeta dividido entre la densidad teórica ($1,25 \text{ g/cm}^3$), este resultado da un $FC=0.87$

Como $FC + \text{porosidad} = 1$ implica que $1-FC=\text{porosidad}$

Porosidad = 13%

Al tener este valor de porosidad influye en los resultados de los ensayos, ya que los resultados teóricos con los experimentales van a diferir unos de otros.



CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Las conclusiones que se ha podido sacar a este trabajo final de grado han sido que se puede modificar un código de programación (GCode) dado por un software y que ese código al introducirlo a una impresora se imprime bien, pero los ajustes entre capas no son tan buenos como el código que da el software.

Las características mecánicas del PLA son mejores que las características mecánicas del PLA impreso en 3D, esto es debido a la porosidad entre las diferentes capas de impresión. Entre las diferentes trayectorias de impresión se observa que los resultados de las trayectorias modificadas y las trayectorias dadas por el software no hay diferencia en los valores mecánicos que se obtienen en los ensayos de tracción y flexión.

Como trabajo futuro se propone hacer probetas de PLA con las mismas trayectorias, pero después de imprimirlas calentarlas para que fundan y rellenen los huecos libres y así intentar bajar del 13% de porosidad para que su comportamiento sea mejor.

Además se podría hacer probetas con otros materiales de impresión 3D que sus características mecánicas se acercaran más a las características de materiales usados en la fabricación de plantillas.

Se propone hacer otro tipo de ensayos a las probetas como ensayos de torsión o ensayos para sacar dureza Shore, ya que son unas características muy importantes para la fabricación de plantillas.

Además se podría hacer una programación para que la macro en Excel estuviese integrada con el software Repetier y no hubiese que copiar y pegar el código en la macro para así que lo hiciese automáticamente desde el propio programa, sin tener que abrir la macro, ya que el programa Repetier es de software libre y permite modificar su código.

Otro aspecto importante como trabajo futuro sería probar otras técnicas de impresión 3D que tenga un mejor acabado entre las capas y así las probetas tengan menos porosidad.



Bibliografía

- [1]. Crump, S.S., *Apparatus and Method for creating Three-Dimensional Objects*, in *United State Patent Office* 1989, Stratasys Inc: United States of America. p. 15.
- [2]. Ian Gibson, D.W.R., Brent Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. 2009 ed 2009: Springer. 460.
- [3]. Neil Hopkinson, R.H., Philip Dickens, *Rapid Manufacturing: an industrial revolution for the Digital Age*. 2006 ed 2006: John Wiley & Sons, Ltd.
- [4]. ASTM, *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, in *Active Standard ASTM F2792 12a* 2012, ASTM International.
- [5]. *Solid Print: Making Things with a 3D Printer Changes the Rules of Manufacturing*, in *The Economist* 2012, The Economist Newspaper Limited: London.
- [6]. *3D printing: The printed world*, in *The Economist* 2011, The Economist Newspaper Ltd: London.
- [7]. Zopf, D.A., et al., *Bioresorbable Airway Splint Created with a Three-Dimensional Printer*. *New England Journal of Medicine*, 2013. **368**(21): p. 2043-2045.
- [8]. Chaput, C.a.L., J.B., *3-D Printing Methods*. *Ceramic Industry*, 2011: p. 15-16.
- [9]. Stratasys. *How PolyJet 3D Printing Works*. 2013; Available from: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technology/polyjet-technology>.
- [10]. Valavaara, V., *Topology Fabrication Apparatus*, in *United States Patent Office* 1986: EEUU. p.9.
- [11]. Masters, W.E., *Computer Automated Manufacturing System*, in *United States Patent Office* 1984: EEUU. p. 10.
- [12]. RepRap. *RepRap Project definition*. 2013; Available from: http://reprap.org/wiki/Main_Page.
- [13]. Domininghaus, H., *Plastics for Engineers: Materials, Properties, Applications* 2000: Hanser Gardner Publications
- [14]. Margolis, J.M., *Engineering Plastics Handbook* 2006: McGraw-Hill.



[15]. Auras, R.A., et al., Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications 2011: Wiley.

[16]. Plastemart. *Starch-based plastic accounted for 90% of global consumption of biodegradable*. 2009; Available from: http://www.plastemart.com/plastic-facts-information.asp?news_id=19315&news=Starchbased-plastic-accounted-for-90-of-global-consumption-of-biodegradable-plastics-in-2009.

[17]. Centric, W., Reducing Resources: From Earth To Resin. PLA vs PLASTICS, 2009.

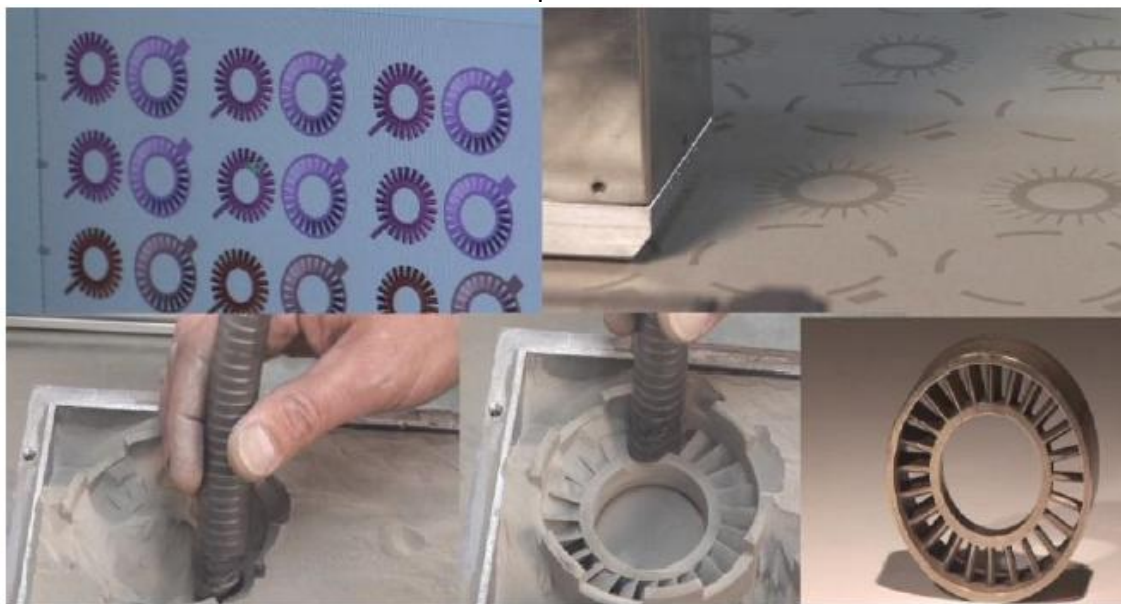
Anexos

Anexo I: Descripción de tecnologías de Impresión 3D

Binder Jetting

Las máquinas que usan esta tecnología, desarrollada por el MIT en 1990 crean las piezas mediante la inyección de un agente endurecedor o agente ligante sobre material en polvo. El material en polvo puede ser metal o un polímero. Este material es depositado en forma de una fina capa sobre la superficie de trabajo. Una vez depositada la primera capa de material, la máquina recorre el patrón de la pieza inyectando el agente endurecedor donde es necesario. Finalizada la primera capa, una nueva capa de polvo es dispensada y una nueva inyección realizada. La altura típica de capa en este tipo de máquinas es de 0.18mm.

Todo el proceso es realizado en una cubeta llena de polvo, por lo que el material que no ha sido tratado con el agente endurecedor se mantiene inalterado y sirve de soporte para posteriores capas como si de un molde se tratara, como se observa en la Ilustración 2. Esto permite una mayor libertad a la hora de realizar formas complejas, con grandes vanos, o sirve de soporte para la realización de matrices de piezas, maximizando así el uso de volumen de impresión.



Proceso de fabricación por Binder Jetting

Una vez que el proceso ha finalizado se procede a la extracción de la pieza de la cubeta llena de polvo. Es necesario limpiar la pieza del polvo adherido para obtener la pieza final, para ello se usa un compresor o una cámara de vacío que devuelve el polvo a la cubeta de trabajo.

En este proceso el único material que es añadido es el agente endurecedor, lo cual representa una pequeña parte del total de la pieza. Esto permite que la velocidad de

impresión sea mayor con respecto a otros métodos de fabricación aditiva. En algunos puede llegar a ser hasta 10 veces superior. Otra ventaja significativa es que la impresión se puede realizar en diferentes colores, con lo que la gama de piezas que puede crear crece considerablemente.

Material Jetting

Esta tecnología es la que está más cercana a la impresión 2D convencional. La creación de piezas se sucede mediante la deposición de pequeñas gotas de material, generalmente fotopolímero, por medio de múltiples inyectores las cuales curan al estar en contacto con luz UV. Algunos modelos de impresoras incluyen además del fotopolímero otro material que puede ser añadido como soporte y después retirado. Este material es, a veces, un polímero soluble en agua y basta con introducir la pieza en agua para retirarlo.

La gama de tipos de material que pueden ser usados en este tipo de máquinas es muy extensa. Existen más rígidos, algunos con acabado tipo gomoso, transparentes y con múltiples colores. El desarrollo de este tipo de materiales ha llevado a la creación de un tipo de bio-polímero compatible con el contacto prolongado con la piel o con mucosas.



Piezas fabricadas mediante Material Jetting

Para conseguir este tipo de impresiones y rango de materiales, la máquina dispone de dos materiales base de cuya mezcla se obtiene el material que se usará en la impresión. A este tipo de materiales se les suele denominar “Materiales Digitales”. En función del tipo de pieza la máquina mezcla estos dos materiales y distribuye las cantidades por sus múltiples –en ocasiones casi 800- inyectores.

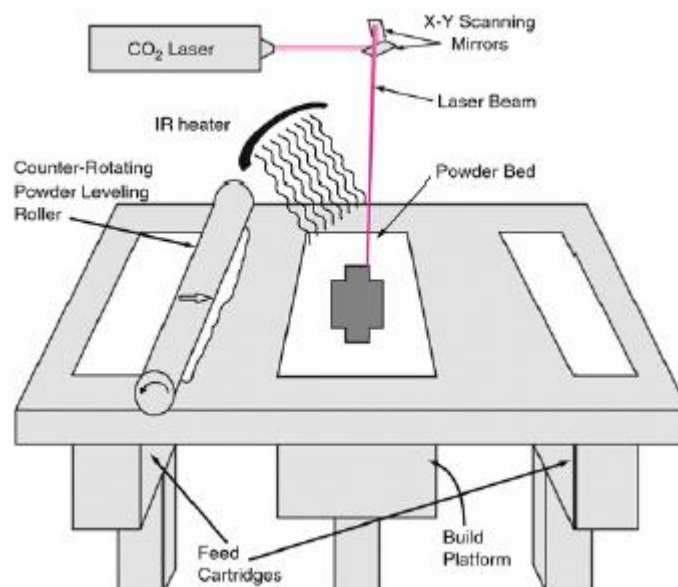
Una de las principales ventajas de esta tecnología es que nos permite hacer un prototipo de diferentes materiales muy cercano al resultado final en una sola

impresión, como puede ser una rueda de un coche con un material más rígido para la llanta y un material gomoso para la cubierta. Un ejemplo de este tipo de fabricación lo encontramos en la Imagen 3 [9].

Powder Bed Fusión

Las piezas fabricadas con este proceso son creadas mediante la fusión de finas capas de material polimérico o metálico que superpuestas crean la pieza final. El primer proceso desarrollado usando esta tecnología fue llevado a cabo por la Universidad de Austin y es conocido como Sinterizado Laser Selectivo, SLS (Selective Laser Sintering). Dada su alta eficacia y su buen acabado, este proceso es usado en múltiples ocasiones para producto final.

El proceso de fabricación usa como material de partida polvo, metálico o polimérico, que es fundido mediante un láser. Estos sistemas tienen una cámara central donde la pieza es creada y depósitos de material a ambos lados. Un rodillo extiende una fina capa de material sobre la zona de trabajo y uno o varios láseres se mueven sobre la superficie con el patrón necesario para fundir el material. Al igual que con el Binder Jetting, el material que no ha sido usado permanece en la cámara para más tarde ser eliminado. El rodillo vuelve a depositar una fina capa de material y los láseres vuelven a crear el patrón, fundiendo una capa con otra.[2] Este proceso queda esquematizado en la Imagen 4.



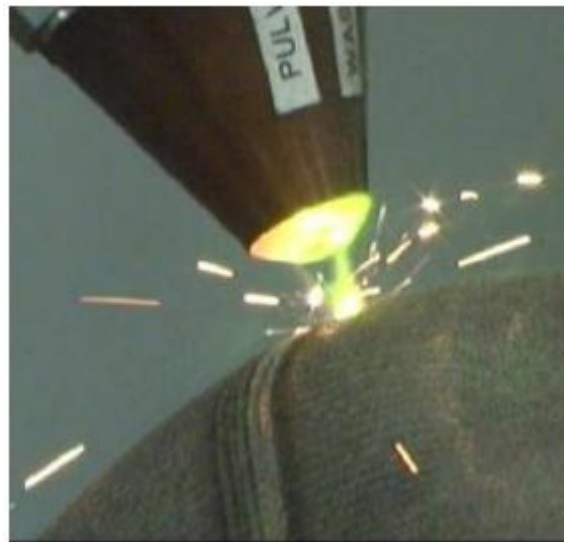
Proceso Powder Bed Fusion

Una de las ventajas principales es que no es necesario ningún material de soporte para construir formas complejas, ya que el material que no ha sido fundido sirve como

soporte. De igual modo no es necesario ningún proceso de curado posterior. Una de las principales desventajas es que la pieza final es muy porosa y suele tener una textura rugosa.

Directed Energy Deposition

Esta tecnología basa su funcionamiento en la deposición de material que es fundido al tiempo que es depositado con un láser u otra fuente de energía. Estas máquinas tienen un funcionamiento similar a las máquinas de deposición fundida que se tratarán en próximos apartados. Sin embargo, en deposición fundida el material es fundido en un inyector y en esta tecnología el polvo es fundido a medida que se deposita en la pieza como se observa en la Imagen 5.

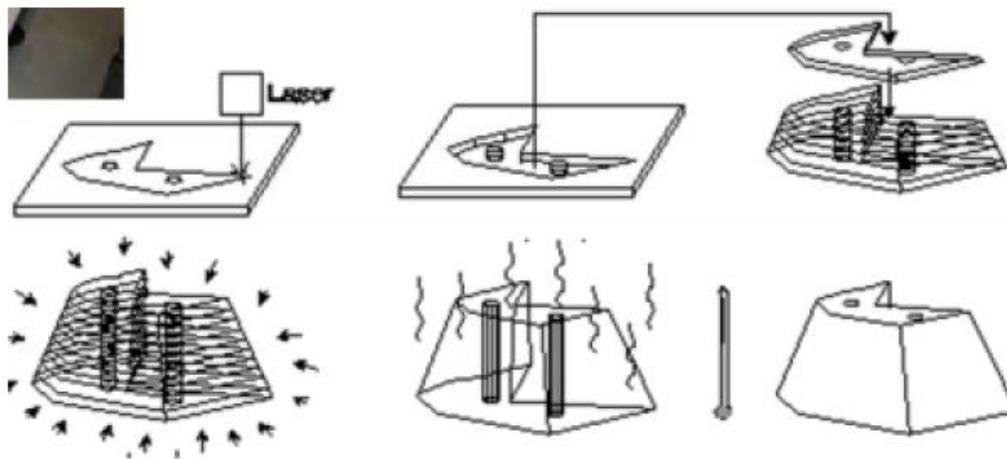


Detalle de un proceso de Directed Energy Deposition

En el caso de la realización de salientes o vanos, estas máquinas requieren un material de soporte o un sistema de 5 ejes que le permita depositar el material en múltiples direcciones. Dada la complejidad, este tipo de procesos no son muy usados para la fabricación de una pieza completa sino más bien para añadir componentes a una pieza ya fabricada o para reparar partes de una pieza dañada.

Sheet Lamination

La pieza resultante de este tipo de procesos es una pieza que nace de la unión de múltiples láminas que ya han sido previamente recortadas y que son unidas mediante un agente ligante. Este proceso queda esquematizado en la Imagen 6. El agente que ejerce la unión es diferente en función del tipo de material. Para el caso de láminas de papel o de plástico se usa pegamento. Para uniones de polímeros también se usa calor. En el caso de los metales se efectúa una soldadura o unión atornillada.



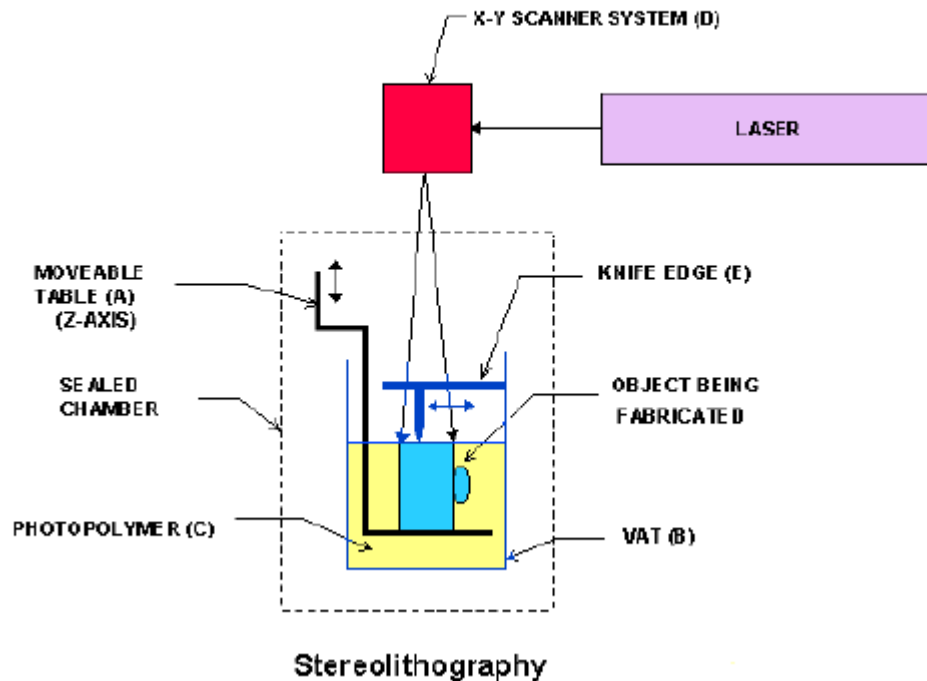
Proceso Sheet Lamination

Esta tecnología responde a la creciente demanda de piezas de titanio, piezas bi-metálicas o bi-aleaciones. De igual modo usando estas técnicas se consigue reducir el tiempo de mecanizado y el tiempo de entrega.

VAT Photopolymerization

Este proceso crea la pieza usando luz para de manera selectiva curar ciertas partes del fotopolímero que se encuentra en una cubeta. El material usado es líquido, resinas curables con radiación o fotopolímeros. Aunque la mayoría de los fotopolímeros reaccionan a la radiación ultravioleta también se usan materiales que son sensibles a la luz visible.

En la actualidad, en el mundo industrial se usan máquinas cuya tecnología es muy elevada y que usa diferentes tipos de radiación como puede ser rayos gamma, rayos x, haz de electrones o UV.

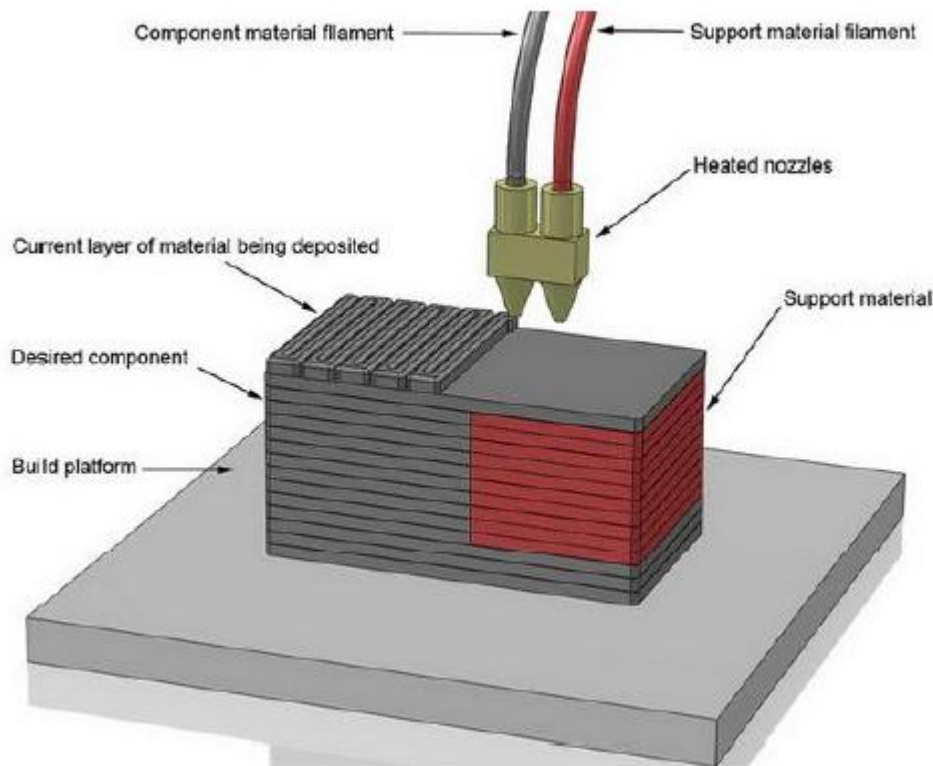


Proceso VAT Photopolimerization

El proceso de impresión en este tipo de máquinas comienza con el proceso de curado de la primera capa de material en la zona superior de la cubeta de resina. Una vez terminado el proceso de curación de esa capa, la pieza asciende una cantidad diferencial (la denominada altura de capa) y se vuelve a iniciar el proceso de curado. De este modo, la pieza va emergiendo de una cubeta de material líquido.

Material Extrusion

En estos procesos el material que está contenido en un depósito es empujado a través de un inyector para ir depositando capa a capa el material que conformará la pieza. Para que la impresión tenga lugar de una manera efectiva, el material que está siendo extruido debe ser de una consistencia semi-sólida cuando sale del inyector. Del mismo modo, este material tiene que solidificar de una manera más o menos acelerada para que pueda soportar el peso de las capas posteriores y solidificar en conjunto con las capas anteriores. Así se conseguirá que la estructura tenga mucha más consistencia. La máquina que imprime con esta tecnología debe ser capaz de moverse en el plano horizontal extruyendo el material al tiempo que es capaz de cortar el flujo de material. Una vez que la capa está concluida, la estructura se mueve hacia arriba o baja la base permitiendo la creación de la nueva capa de material.



Proceso de extrusión de material

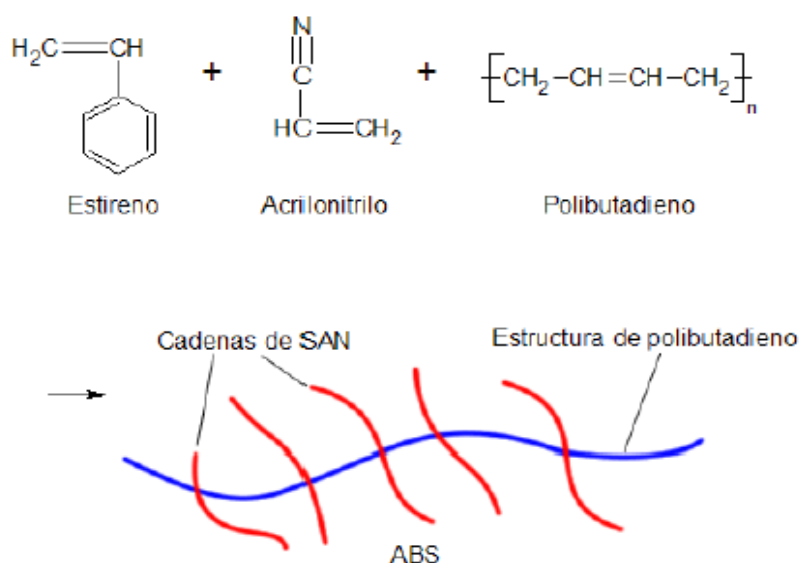
Dentro de esta tecnología existen dos formas principales de realizar el proceso. La más comúnmente usada es realizar el control del estado del material mediante temperatura. El material reblandecido o fundido por la temperatura es extrudido a través del inyector, uniéndose con el material previamente depositado antes de su endurecimiento.

La otra forma de enfrentarse al proceso de impresión es mediante un cambio químico que genere la solidificación. En estos casos, el proceso común de impresión se ve completado con un agente activador del endurecimiento, una reacción con el aire o simplemente un proceso de secado que permite la unión de las capas entre sí. Esta segunda forma de realizar la impresión es comúnmente usada en casos en los que se requiere de cierta biocompatibilidad.

Anexo II: Características de materiales usados en tecnología FDM

- **ABS**

El ABS es un polímero termoplástico compuesto por tres tipos de monómeros. Acrilonitrilo, butadieno y estireno se combinan para dar como resultado una de las sinergias más usadas en mundo de los polímeros comerciales. Su fórmula molecular es $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$



El polímero resultante es la combinación de las propiedades que le proporciona cada monómero. Así tiene una gran resistencia química, buena resistencia a la fatiga y dureza y rigidez gracias al acrilonitrilo. El butadieno, como componente elastomérico, aporta buena tenacidad y resistencia al impacto. Por otro lado el estireno aporta la resistencia al calor, aumenta su procesabilidad, dureza y rigidez, y permite la adición de color. Las resinas ABS contienen generalmente entre un 21 a 27% de acrilonitrilo, de un 12 a un 25% de butadieno y un 54 a 63% de estireno.

Gracias a esta combinación de propiedades el ABS está cada vez más extendido en sectores cada vez más diversos e introducido en nuestro día a día como un producto más. De hecho el consumo de ABS hoy día sigue creciendo y estas propiedades son de las razones por las que se ha escogido como uno de los materiales principales para la impresión 3D de bajo coste.

Esta resina de ABS es un sistema bifásico constituido por la combinación de una fase matriz de SAN (copolímero de estireno-acrilonitrilo) en la que podemos encontrar las

partículas de polibutadieno, a las cuales se le ha injertado una capa de SAN para mejorar la interacción entre ambas fases.[13]

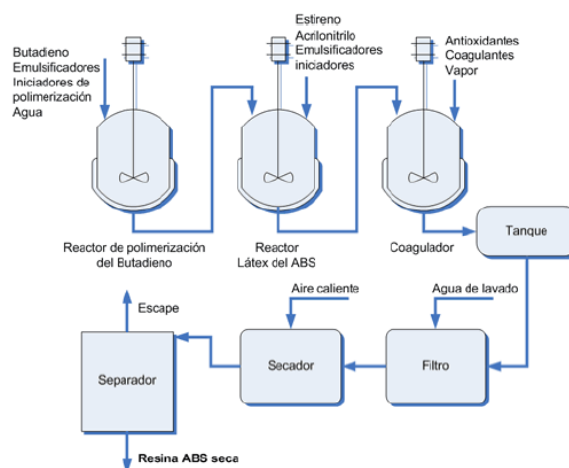
Fabricación de ABS

En la fabricación del ABS existen tres modos de llegar al ABS final. Antes se describen, cuáles son los procesos para llegar a cada uno de sus componentes.

- El acrilonitrilo es producido en cantidades comerciales casi exclusivamente por un método desarrollado en fase vapor en el que se produce la oxidación del propileno y amoniaco con catalizador.
- El butadieno es producido primariamente como un subproducto en el vapor del cracking de hidrocarburos para producir etileno.
- La manufactura del Estireno se realiza principalmente por el método de la deshidrogenación del etilbenceno.

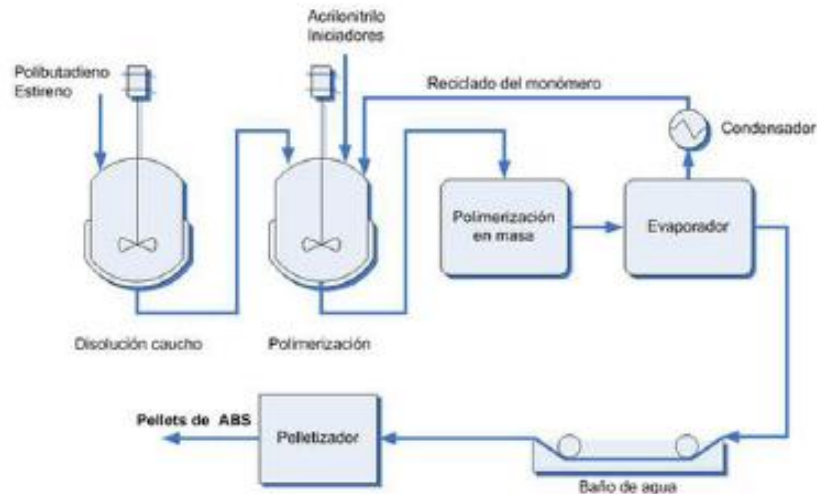
Del ABS objeto de estudio no disponemos de la información acerca de la forma de polimerización ya que el fabricante se niega a facilitarla. Los tres tipos de fabricación son:

- **Polimerización en emulsión.** Este proceso involucra dos pasos. Se produce un látex de caucho y luego se polimeriza el estireno y el acrilonitrilo en presencia del caucho para producir un látex de ABS. Este látex luego es procesado para aislar a la resina ABS.



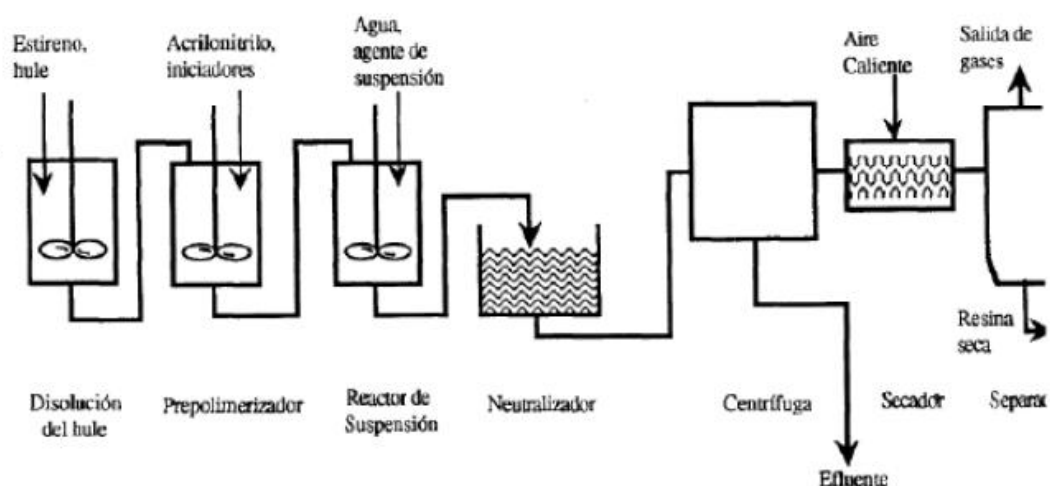
Polimerización en emulsión

- **Polimerización en masa:** Aquí la polimerización es conducida en un monómero. Este proceso usualmente consiste en una serie de dos o más reactores continuos en el cual el caucho usado en este proceso es comúnmente una solución polimerizada de polibutadieno lineal.



Polimerización en masa

- **Polimerización en suspensión:** El proceso de suspensión utiliza una reacción en masa para producir una mezcla en la que hay material parcialmente convertido en polímero y monómeros y luego emplea una técnica de reacción en suspensión para completar la polimerización.



Polimerización en suspensión



Las características de la resina final ABS están principalmente influenciadas por el copolímero estireno/acrilonitrilo que forma la matriz principal. El incremento del peso molecular de este copolímero causa una reducción de la fluidez, un incremento de la resistencia a impacto y una disminución de la fluencia. De igual modo mejora la resistencia de la superficie del polímero frente a sustancias activas. Este copolímero mejora fuertemente sus propiedades frente al poliestireno de partida, sin embargo provoca una coloración amarillenta del material, una mayor absorción de humedad y posee peores propiedades eléctricas.[14]

Propiedades Mecánicas ABS	
Alargamiento en la rotura (%)	45
Coefficiente de fricción	0,5
Módulo de tracción (GPa)	2,1-2,4
Resistencia a la tracción (MPa)	41-45
Resistencia al impacto Izod (J/m ⁻¹)	200-400
Densidad (g/cm ³)	1,05

Mercado ABS

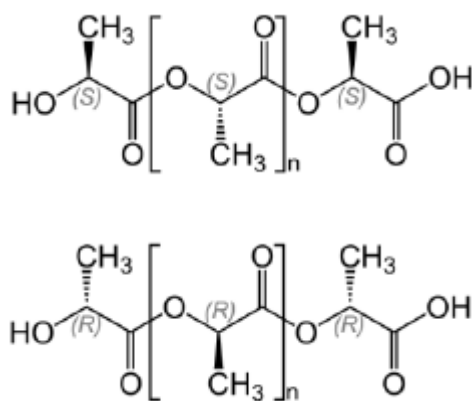
El mercado del ABS está asociado a múltiples productos, como carcasas de los móviles, juguetes, electrodomésticos y en último, por ahora, lugar la impresión 3D. Basándonos en datos de los proveedores de material para la impresión 3D en España podemos hacer aproximadamente una estimación del consumo de ABS a nivel español destinado a la impresión 3D. Así, y después de haber consultado a las diferentes empresas el consumo queda:

Año	Consumo ABS para impresión 3D en Kg
2012	750
2013 (a septiembre)	1600

En cuanto a los precios dependiendo del tipo de ABS toman éstos un valor u otro. En el caso del ABS natural el precio del kg de filamento es de 22€/kg. En el caso del transparente sube a 25€/kg y para el ABS Fosforescente a 45€ el kg.

- **PLA**

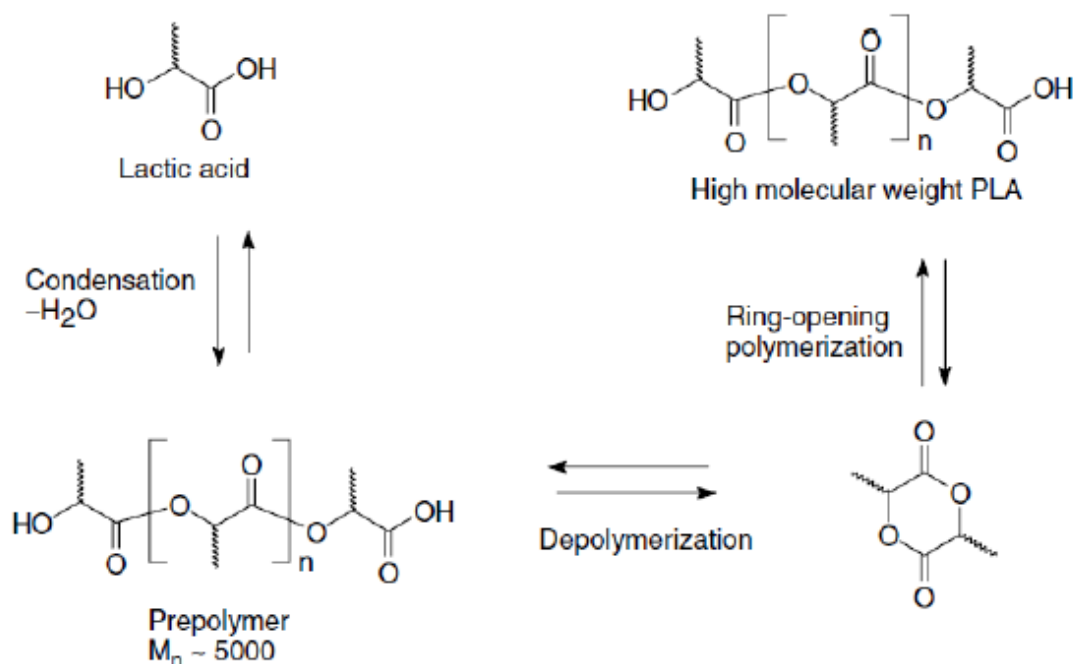
El PLA es un poliéster termoplástico alifático que procede de recursos renovables como pueden ser los restos de maíz, las raíces de tapioca, trozos de madera o de caña de azúcar. Su forma molecular es $(C_3H_4O_2)_n$. Es un termoplástico rígido que puede ser semicristalino o totalmente amorfo. Es en muchas ocasiones comparado con el PET por su comportamiento. EL PLA puede ser usado para fabricar botellas por soplado, comercializarse en fibras o en láminas transparentes como sucede con el más común PET. Por otro lado, el PLA es el llamado “filamento food safe” por sus excelentes características organolépticas y es perfecto para aplicaciones en las que tiene contacto directo con la comida. A pesar de sus buenas características, el mayor coste de producción respecto a otros polímeros ha provocado que no sea uno de los plásticos más usados.[15]



Una de las características que hacen al PLA único en el mercado es que el material de partida para el polímero final, el ácido láctico, está fabricado por un proceso de fermentación con el 100% de los materiales provenientes de recursos renovables. De igual modo el polímero se degrada fácilmente en el ambiente y los productos resultantes tienen una escasa toxicidad.

Proceso de fabricación del PLA

EL proceso de fabricación de PLA más usado es el desarrollado y patentado por la compañía Cargill Dow. El proceso comienza con ácido láctico producido por la fermentación de la dextrosa, seguido de una reacción de condensación continua de ácido láctico acuoso para producir un prepolímero de peso molecular bajo. El prepolímero se convierte en una mezcla de isómeros de lactida que junto a un catalizador realiza la reacción de ciclo. Esta mezcla de lactida se purifica con destilación en vacío.



Fabricación del PLA

Propiedades Mecánicas PLA	
Alargamiento en la rotura (%)	45
Límite elástico(Mpa)	60
Módulo de tracción (GPa)	2,1-2,4
Resistencia a la tracción (MPa)	53
Módulo de Young (GPa)	3.5
Porcentaje de elongación(%)	6

Mercado PLA

Dentro del mercado de los polímeros biodegradables, el PLA y el PHA, copaban en el año 2009 el 90% del consumo mundial con 659000 toneladas. Sin embargo, esta gran cuota no es nada si la comparamos con el global de los plásticos a nivel mundial, ya que solo representa el 1% de todo el consumo global aproximadamente.

Con la impresión 3D se ha abierto una nueva vía de desarrollo y comercialización al PLA. De hecho considerando la creciente tendencia a sustituir nuestros productos por productos más respetuosos con el medio ambiente, esta industria tiene un gran potencial. Este hecho ha provocado que un mercado nuevo se cree en China. De hecho la capacidad del país para producir PLA pasara de 80.000 toneladas en 2007 a 150.000



en 2009. Este crecimiento es debido a la demanda en el resto del mundo ya que en China apenas se consumen 8.000 toneladas. El resto del PLA es exportado a países de Europa y América.[16]

El ácido poliláctico no solo es usado para envases de comida o para la impresión 3D. El PLA se usa comúnmente en implantes médicos en forma de tornillos, varillas o mallas. Un uso que se está extendiendo cada vez más es en la agricultura para aislar la tierra de la radiación solar y que puedan crecer cierto tipo de plantaciones. Su uso también es común en las bolsas de té.

Dentro del mercado español de la impresión 3D su uso aún no está muy reconocido, pero poco a poco va entrando en un mercado dominado por el ABS. El precio del PLA depende mucho de la compañía a la que sea comprado. En nuestro caso el PLA se compra a 22 €/kg. Según las compañías españolas que venden material de impresión 3D consultadas su consumo es el siguiente:


Año	Consumo PLA para impresión 3D en Kg
2012	150
2013 (a septiembre)	320

Resulta interesante comparar el PLA en cuanto a la energía necesaria para fabricarlo, el agua usada y las emisiones que produce un kilo de material. En el siguiente estudio se ha comparado el PLA con otros plásticos muy usados en la industria como son el PET, el PP o EPS (Poliestireno expandido). En la siguiente tabla se pueden ver los resultados según la asociación World Centric[17]:

Materiales	Agua consumida	Energía	Emisiones CO ₂
PLA	62.67 l	7.39 KWh	240 gr
PP	39 l	9.25 KWH	1530 gr
PET	56.24 l	10.17 KWH	2520 gr
EPS	155.21 l	11.17KWh	2250 gr

De esta tabla podemos extraer por qué muchos abogan por el PLA como sustitutivo al ABS en la impresión 3D.

Anexo III: Resultados de los ensayos de Tracción y Flexión



11.11.15

Informe de ensayos

Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

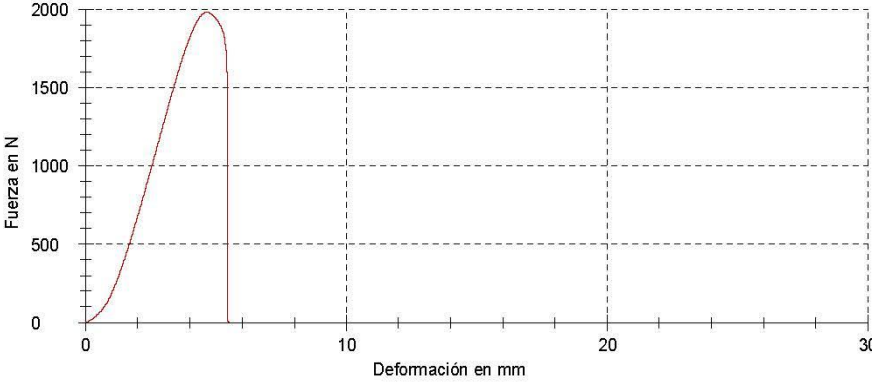
Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 1 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	Identificación de la probeta	Fecha	Hora	Fecha/Hora	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa
6		11/11/2015	18:10:52	11/11/2015 18:10:52	0,0329	1,65	676	19,4	-

Nº	ε_Y %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm²
6	-	49,6	2,2	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ε_Y %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm²
n = 1											
\bar{x}	0,0329	1,65	676	19,4	-	-	49,6	2,2	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Zwick / Roell

11.11.15

Informe de ensayos

Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

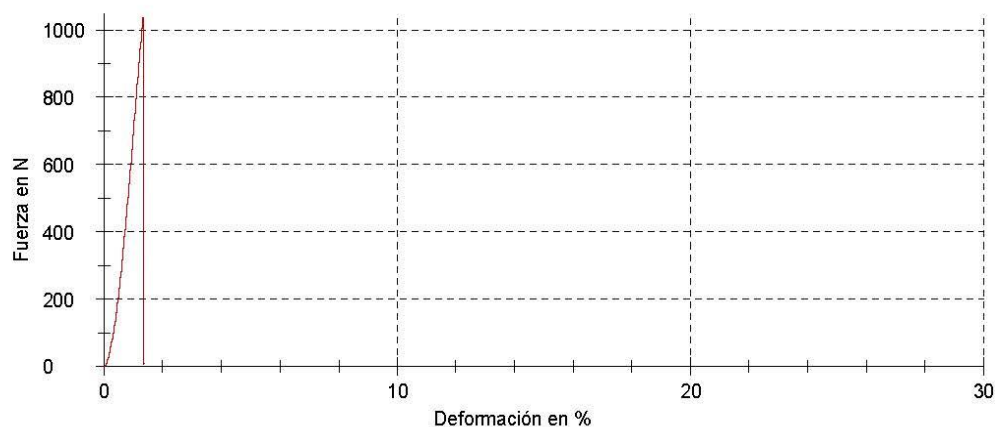
Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 1 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_{x2} MPa	σ_{x3} MPa	σ_{x4} MPa	σ_{x5} MPa	σ_{x6} MPa	σ_Y MPa	ϵ_Y %	ϵ_Y (corr.) %	ϵ_{LY} %	σ_M MPa
1	0,0831	1,76	862	17,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25,9

Nº	ϵ_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
1	1,3	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_{x2} MPa	σ_{x3} MPa	σ_{x4} MPa	σ_{x5} MPa	σ_{x6} MPa	σ_Y MPa	ϵ_Y %	ϵ_Y (corr.) %	ϵ_{LY} %	σ_M MPa
n = 1	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	%	%	MPa
\bar{x}	0,0831	1,76	862	17,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25,9
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Informe de ensayos

Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

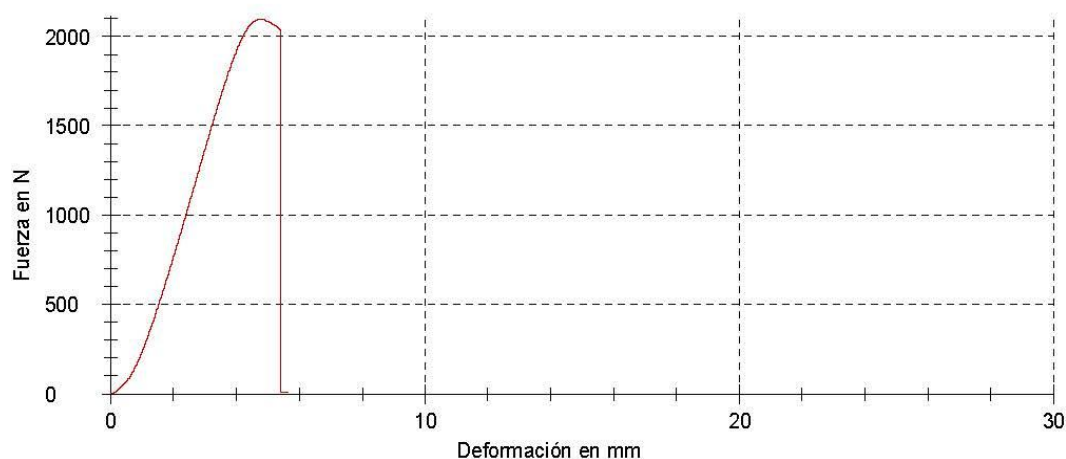
Velocidad módulo de tracción : 5 mm/min
 Velocidad de ensayo : 5 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	Identificación de la probeta	Fecha	Hora	Fecha/Hora	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa
15		11/11/2015	18:56:49	11/11/2015 18:56:49	0,0637	2,01	840	22,0	-

Nº	ϵ_Y %	σ_M MPa	ϵ_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
15	-	52,4	2,2	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ϵ_Y %	σ_M MPa	ϵ_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
n = 1											
\bar{x}	0,0637	2,01	840	22,0	-	-	52,4	2,2	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Zwick / Roell

11.11.15

Informe de ensayos

Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

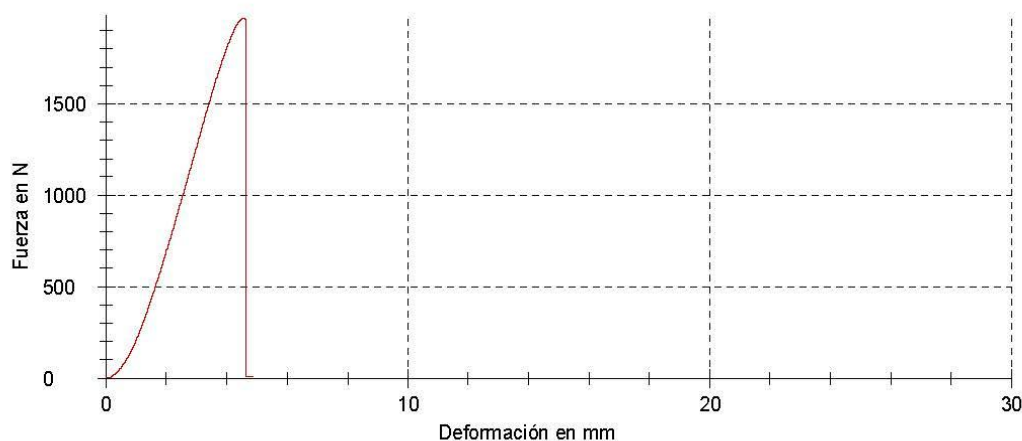
Velocidad módulo de tracción : 5 mm/min
 Velocidad de ensayo : 5 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	Identificación de la probeta	Fecha	Hora	Fecha/Hora	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa
20		11/11/2015	19:12:01	11/11/2015 19:12:01	0,0559	1,75	697	19,9	-

Nº	ε_Y %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
20	-	49,2	2,1	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ε_Y %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
n = 1											
\bar{x}	0,0559	1,75	697	19,9	-	-	49,2	2,1	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Zwick / Roell

11.11.15

Informe de ensayos

Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

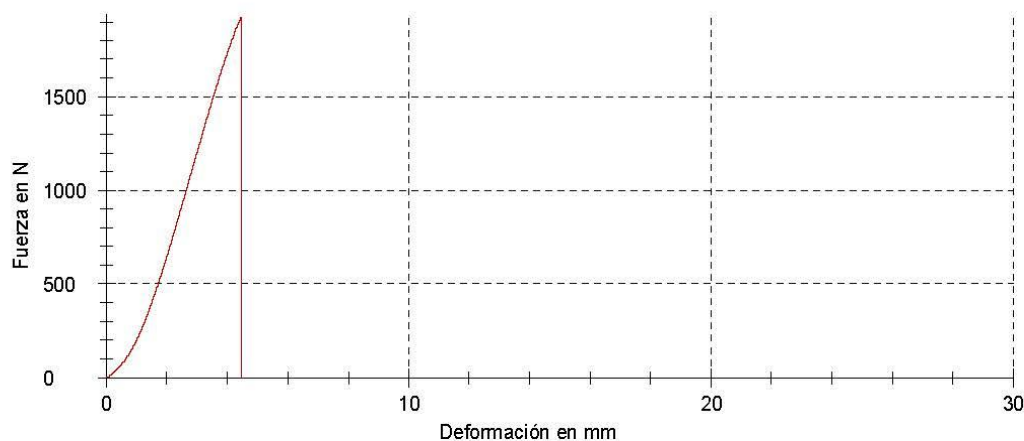
Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 1 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	Identificación de la probeta	Fecha	Hora	Fecha/Hora	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa
3		11/11/2015	17:53:36	11/11/2015 17:53:36	0,0353	1,93	823	18,2	-

Nº	ε_Y %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
3	-	48,1	2,1	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ε_Y %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
n = 1											
\bar{x}	0,0353	1,93	823	18,2	-	-	48,1	2,1	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



13.11.15

Informe de ensayos

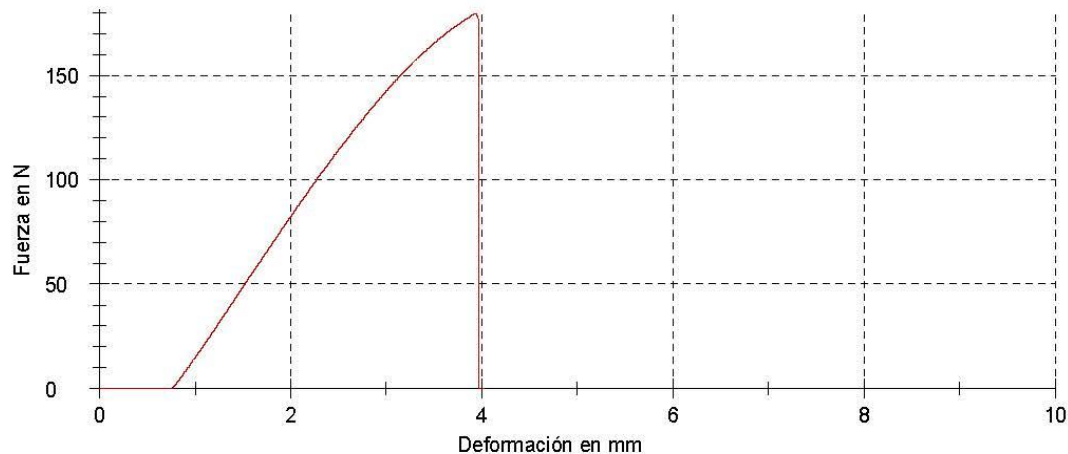
Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

Velocidad módulo de flexión : 5 mm/min
 Velocidad de ensayo : 5 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_f MPa	$\sigma_{0,1}$ MPa	$\sigma_{0,2}$ MPa	σ_{fy} MPa	ε_{fy} %	σ_{fM} MPa	ε_{fM} %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
4	-0,0608	-0,0601	6,19	-0,0703	-0,0747	-	-	82,5	3,9	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_f MPa	$\sigma_{0,1}$ MPa	$\sigma_{0,2}$ MPa	σ_{fy} MPa	ε_{fy} %	σ_{fM} MPa	ε_{fM} %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
n = 1	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	mm ²
x	-0,0608	-0,0601	6,19	-0,0703	-0,0747	-	-	82,5	3,9	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



10.11.15

Informe de ensayos

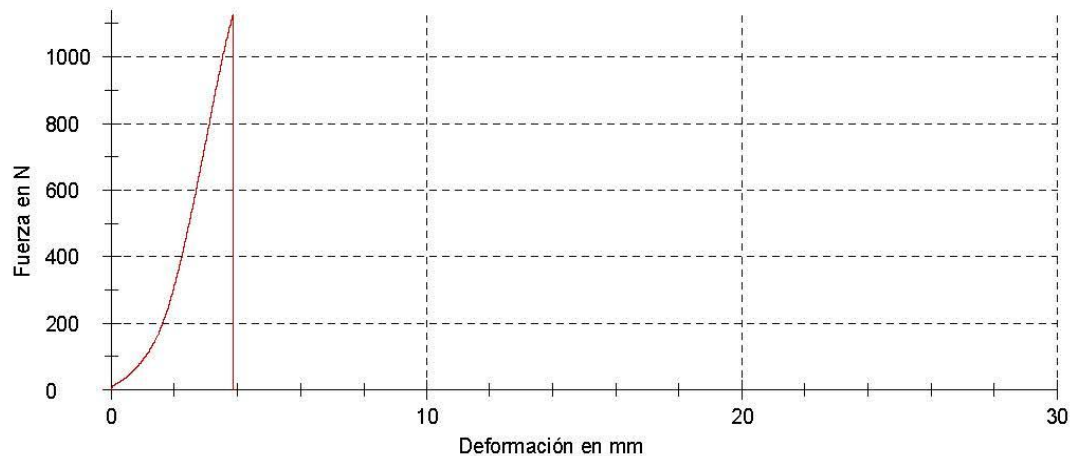
Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 1 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	L ₀ mm	E _t MPa	σ _Y MPa	σ _M MPa	ε _M %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
11	209,69	332	-	28,2	1,8	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	L ₀	E _t	σ _Y	σ _M	ε _M	h	b	A ₀
n = 1	mm	MPa	MPa	MPa	%	mm	mm	mm ²
x	209,69	332	-	28,2	1,8	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-



12.11.15

Informe de ensayos

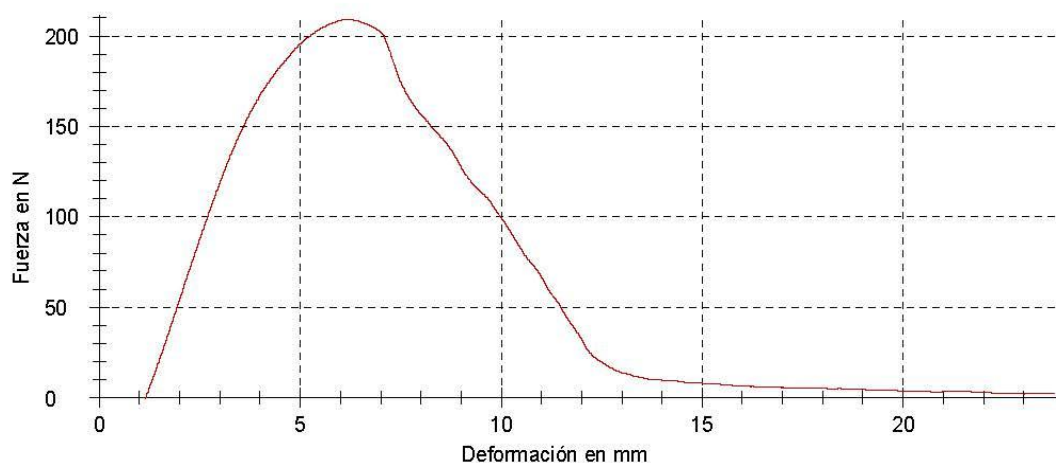
Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº. : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

Velocidad módulo de flexión : 10 mm/min
 Velocidad de ensayo : 10 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_r MPa	$\sigma_{0,1}$ MPa	$\sigma_{0,2}$ MPa	σ_{x1} MPa	σ_{fy} MPa	ε_{fy} %	σ_{fM} MPa	ε_{fM} %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
10	-1,54	-1,54	0,524	-1,53	-1,53	-1,54	-	-	78,5	9,2	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_r MPa	$\sigma_{0,1}$ MPa	$\sigma_{0,2}$ MPa	σ_{x1} MPa	σ_{fy} MPa	ε_{fy} %	σ_{fM} MPa	ε_{fM} %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
n = 1	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	mm ²
x	-1,54	-1,54	0,524	-1,53	-1,53	-1,54	-	-	78,5	9,2	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



11.11.15

Informe de ensayos

Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº. : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

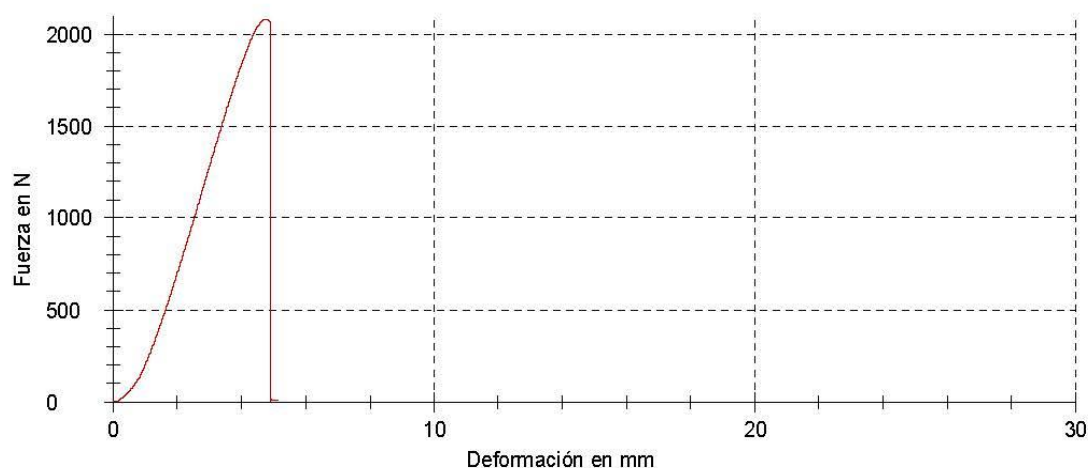
Velocidad módulo de tracción : 5 mm/min
 Velocidad de ensayo : 5 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	Identificación de la probeta	Fecha	Hora	Fecha/Hora	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa
19		11/11/2015	19:09:10	11/11/2015 19:09:10	0,0503	1,72	707	20,2	-

Nº	ϵ_Y %	σ_M MPa	ϵ_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
19	-	52,0	2,2	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ϵ_Y %	σ_M MPa	ϵ_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
n = 1											
\bar{x}	0,0503	1,72	707	20,2	-	-	52,0	2,2	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Informe de ensayos

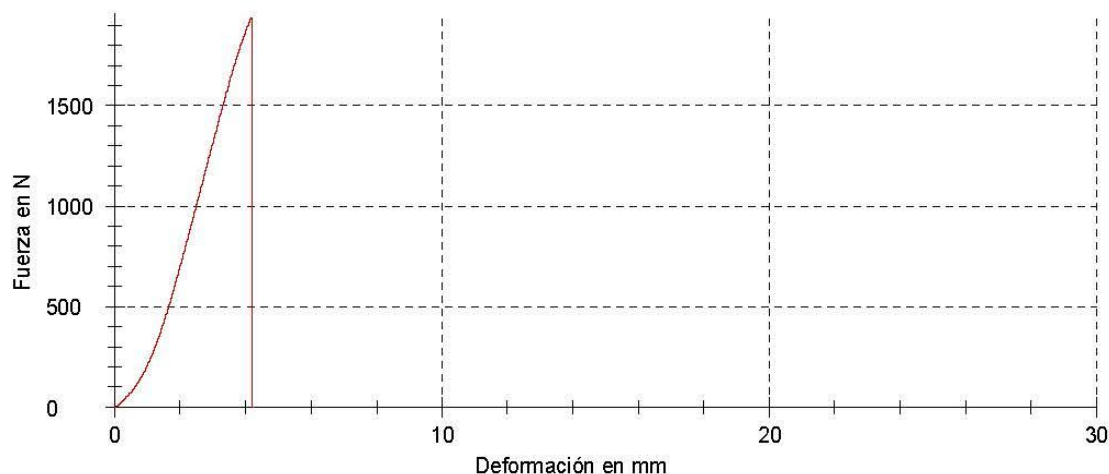
Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº. : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 1 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
1	0,239	1,87	891	17,6	-	48,4	2,1	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
n = 1	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	mm	mm	mm ²
\bar{x}	0,239	1,87	891	17,6	-	48,4	2,1	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Zwick / Roell

11.11.15

Serie	σ_{low}	σ_{high}	E_t	σ_{x1}	σ_Y	ε_Y	σ_M	ε_M	h	b	A_0
n = 2	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	mm ²
\bar{x}	0,0589	2,14	858	21,5	-	-	49,8	2,1	4	10	40,00
s	0,0160	0,336	142	1,19	-	-	1,58	0,1	0,000	0,000	0,00
v	27,26	15,71	16,61	5,55	-	-	3,18	3,87	0,00	0,00	0,00

Zwick / Roell

11.11.15

Informe de ensayos

Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

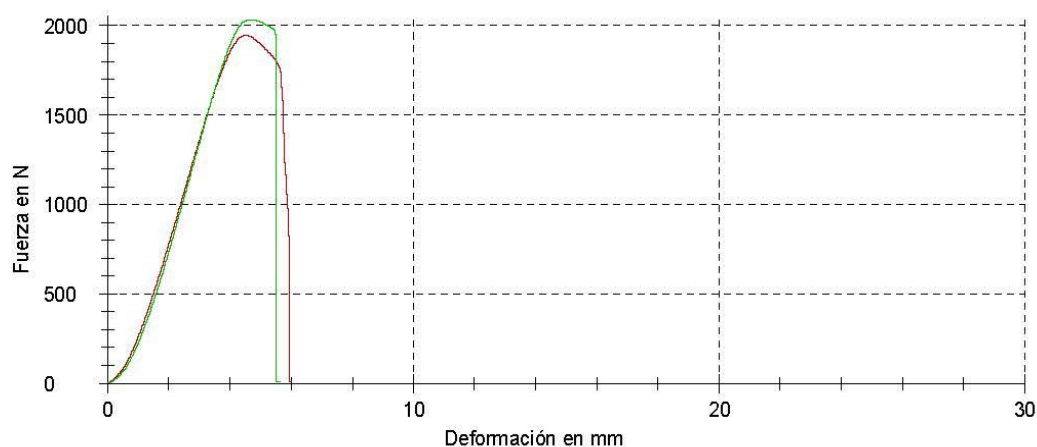
Velocidad módulo de tracción : 5 mm/min
 Velocidad de ensayo : 5 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	Identificación de la probeta	Fecha	Hora	Fecha/Hora	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa
11		11/11/2015	18:44:45	11/11/2015 18:44:45	0,0475	2,38	958	22,3	-
14		11/11/2015	18:53:17	11/11/2015 18:53:17	0,0702	1,90	757	20,6	-

Nº	ϵ_Y %	σ_M MPa	ϵ_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
11	-	48,6	2,1	4	10	40,00
14	-	50,9	2,2	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:



13.11.15

Informe de ensayos

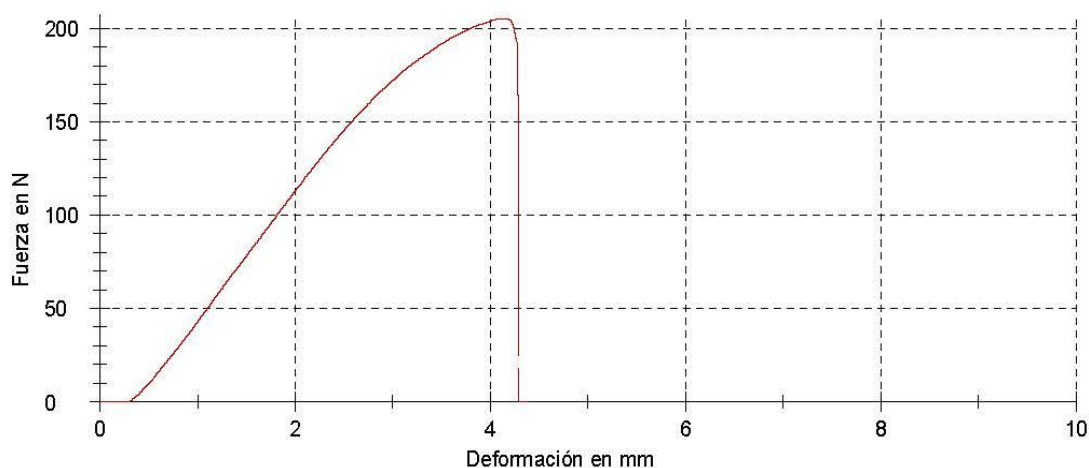
Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº. : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

Velocidad módulo de flexión : 5 mm/min
 Velocidad de ensayo : 5 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	E _f MPa	σ _{0,1} MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{TY} MPa	ε _{TY} %	σ _{TM} MPa	ε _{TM} %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
3	-4,43	-0,0554	-0,0580	-	-	94,2	4,1	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie n = 1	E _f MPa	σ _{0,1} MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{TY} MPa	ε _{TY} %	σ _{TM} MPa	ε _{TM} %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
x	-4,43	-0,0554	-0,0580	-	-	94,2	4,1	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Informe de ensayos

Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº. : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

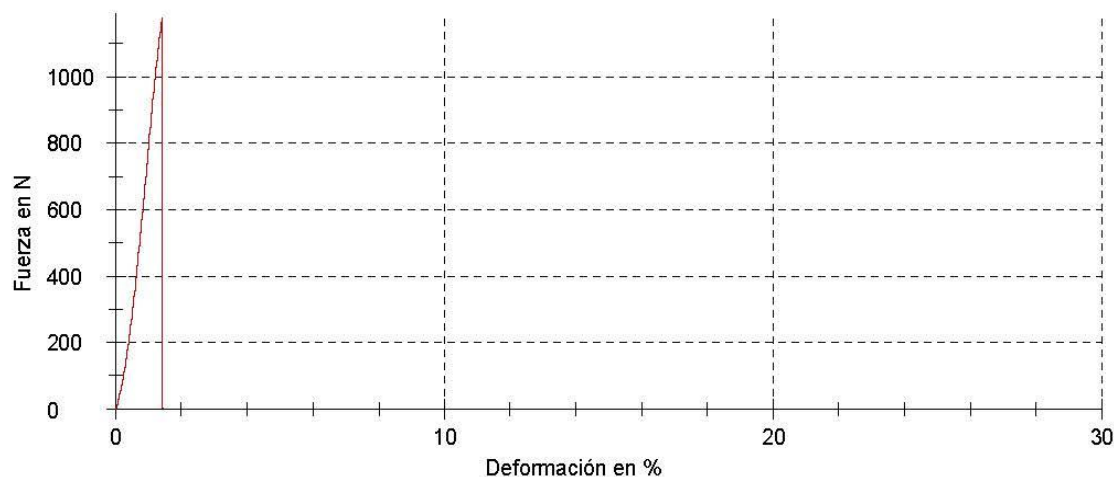
Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min

Velocidad de ensayo : 1 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	L ₀ mm	E _t MPa	σ_Y MPa	σ_M MPa	ϵ_M %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
10	217,06	1120	-	29,4	1,4	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	L ₀ mm	E _t MPa	σ_Y MPa	σ_M MPa	ϵ_M %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
n = 1	mm	MPa	MPa	MPa	%	mm	mm	mm ²
x	217,06	1120	-	29,4	1,4	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-

Informe de ensayos

Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

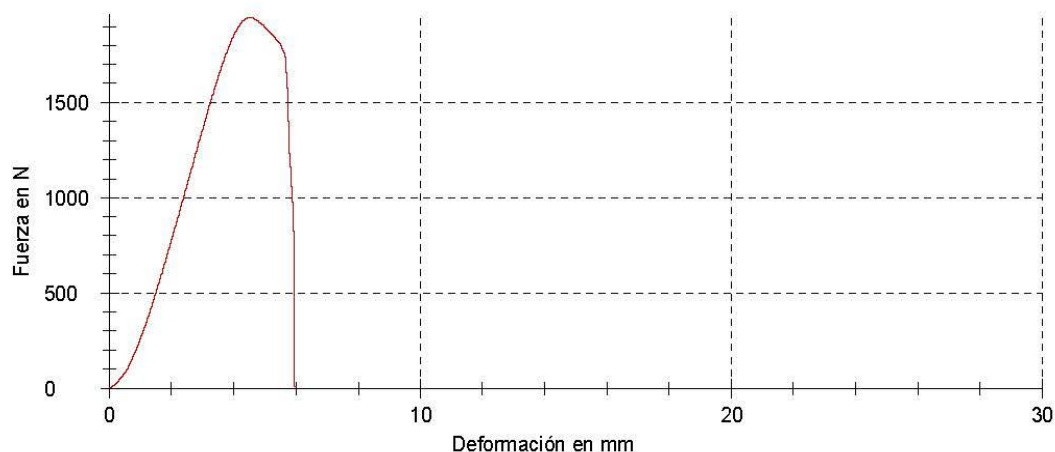
Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 1 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	Identificación de la probeta	Fecha	Hora	Fecha/Hora	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa
11		11/11/2015	18:44:45	11/11/2015 18:44:45	0,0475	2,38	958	22,3	-

Nº	ϵ_Y %	σ_M MPa	ϵ_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
11	-	48,6	2,1	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low}	σ_{high}	E_t	σ_{x1}	σ_Y	ϵ_Y	σ_M	ϵ_M	h	b	A_0
n = 1	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	mm ²
\bar{x}	0,0475	2,38	958	22,3	-	-	48,6	2,1	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



11.11.15

Informe de ensayos

Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº. : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

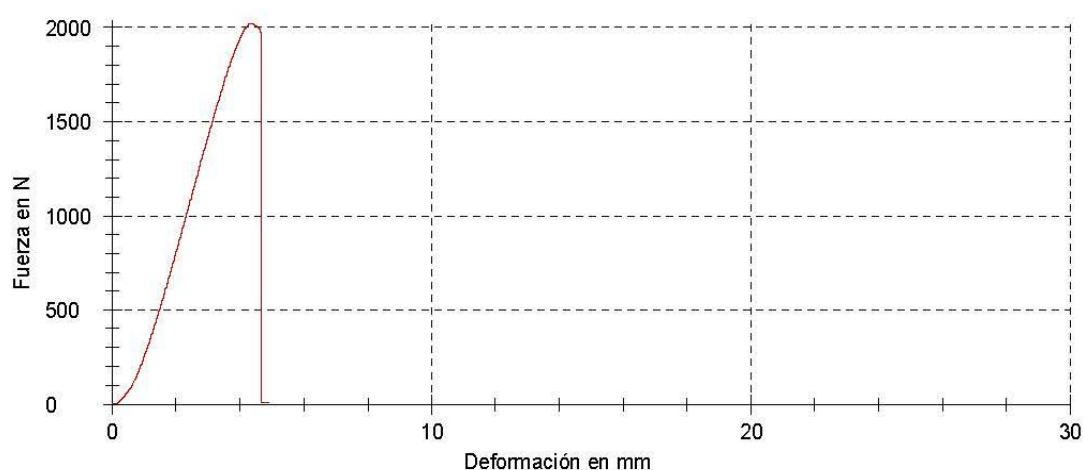
Velocidad módulo de tracción : 5 mm/min
 Velocidad de ensayo : 5 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	Identificación de la probeta	Fecha	Hora	Fecha/Hora	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa
18		11/11/2015	19:06:17	11/11/2015 19:06:17	0,0792	2,00	813	22,9	-

Nº	ε_Y %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
18	-	50,5	2,0	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ε_Y %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
n = 1	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	mm ²
\bar{x}	0,0792	2,00	813	22,9	-	-	50,5	2,0	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Zwick / Roell

11.11.15

Informe de ensayos

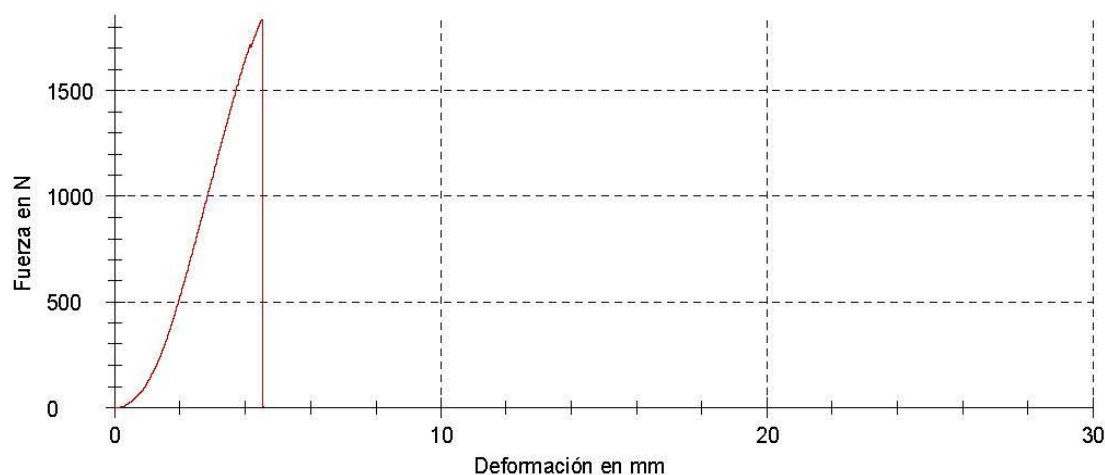
Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº. : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 1 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ϵ_Y %	$\epsilon_Y (corr.)$ %	ϵ_{tY} %	σ_M MPa	ϵ_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
4	0,0553	0,868	422	15,3	-	-	-	-	45,9	2,1	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ϵ_Y %	$\epsilon_Y (corr.)$ %	ϵ_{tY} %	σ_M MPa	ϵ_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
n = 1	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	%	%	MPa	%	mm	mm	mm ²
x	0,0553	0,868	422	15,3	-	-	-	-	45,9	2,1	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



13.11.15

Informe de ensayos

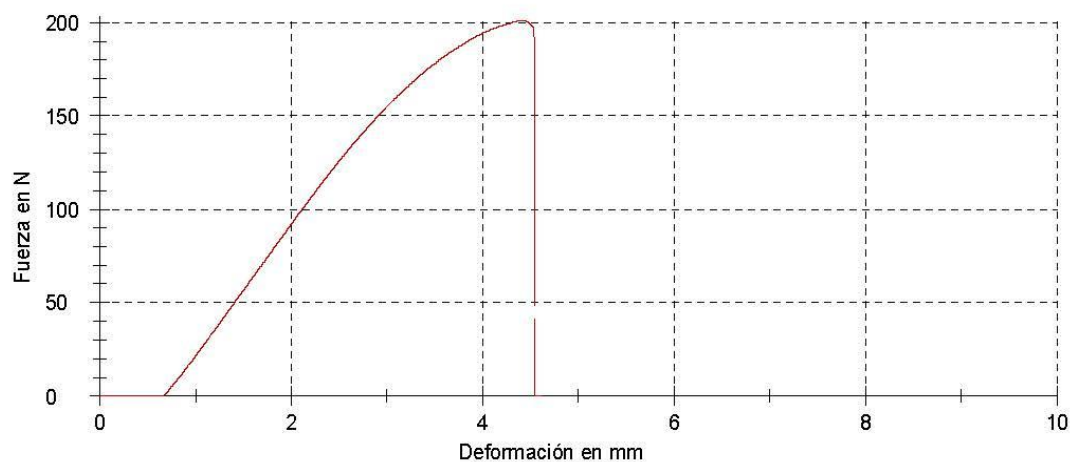
Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

Velocidad módulo de flexión : 5 mm/min
 Velocidad de ensayo : 5 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	E _f MPa	σ _{0,1} MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{RY} MPa	ε _{RY} %	σ _{RM} MPa	ε _{RM} %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
2	4,86	-0,0569	-0,0614	-	-	92,4	4,4	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	E _f MPa	σ _{0,1} MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{RY} MPa	ε _{RY} %	σ _{RM} MPa	ε _{RM} %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
n = 1	MPa	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	mm ²
x	4,86	-0,0569	-0,0614	-	-	92,4	4,4	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Zwick / Roell

10.11.15

Informe de ensayos

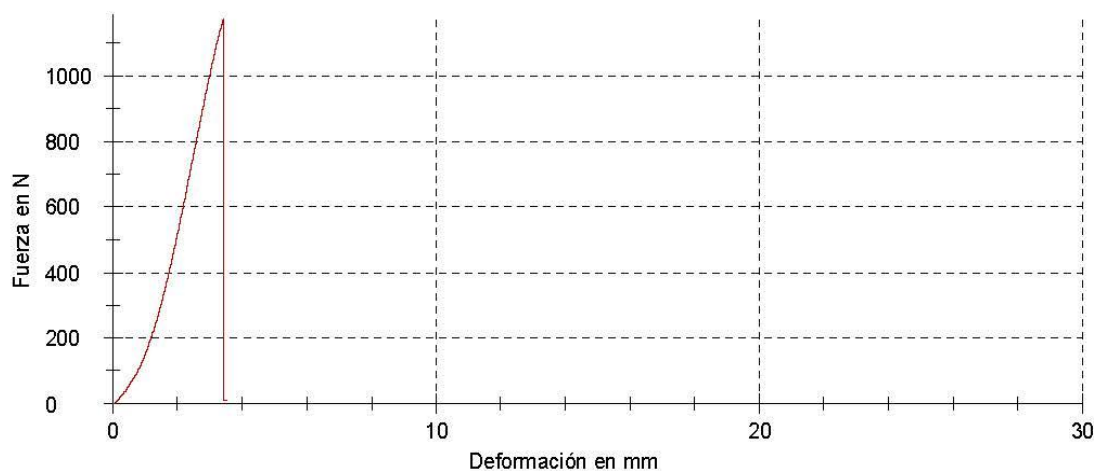
Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº. : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 1 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	L ₀ mm	E _t MPa	σ_Y MPa	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
7	221,07	711	-	29,4	1,5	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	L ₀	E _t	σ_Y	σ_M	ε_M	h	b	A ₀
n = 1	mm	MPa	MPa	MPa	%	mm	mm	mm ²
x	221,07	711	-	29,4	1,5	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-



11.11.15

Informe de ensayos

Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

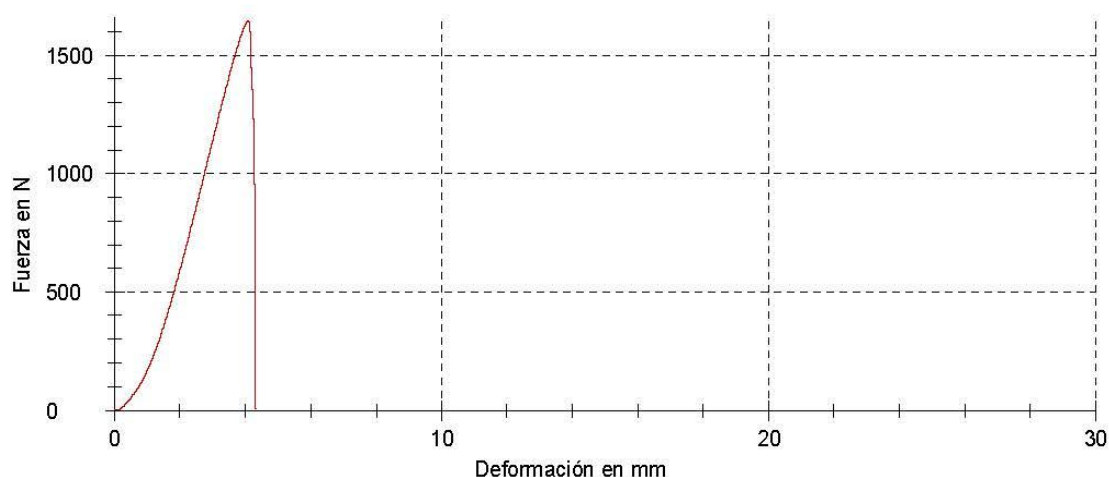
Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 1 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	Identificación de la probeta	Fecha	Hora	Fecha/Hora	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa
9		11/11/2015	18:29:18	11/11/2015 18:29:18	0,0206	1,54	649	17,3	-

Nº	ϵ_Y %	σ_M MPa	ϵ_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
9	-	41,1	1,9	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ϵ_Y %	σ_M MPa	ϵ_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
n = 1											
\bar{x}	0,0206	1,54	649	17,3	-	-	41,1	1,9	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



11.11.15

Informe de ensayos

Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

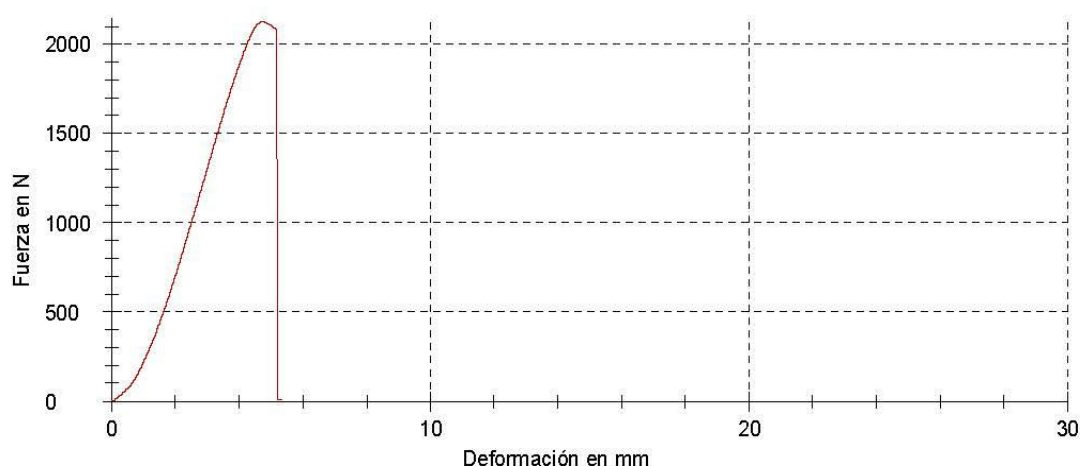
Velocidad módulo de tracción : 5 mm/min
 Velocidad de ensayo : 5 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	Identificación de la probeta	Fecha	Hora	Fecha/Hora	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa
17		11/11/2015	19:03:13	11/11/2015 19:03:13	0,0593	1,99	833	20,2	-

Nº	ε_Y %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
17	-	53,1	2,2	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ε_Y %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
n = 1											
\bar{x}	0,0593	1,99	833	20,2	-	-	53,1	2,2	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



13.11.15

Informe de ensayos

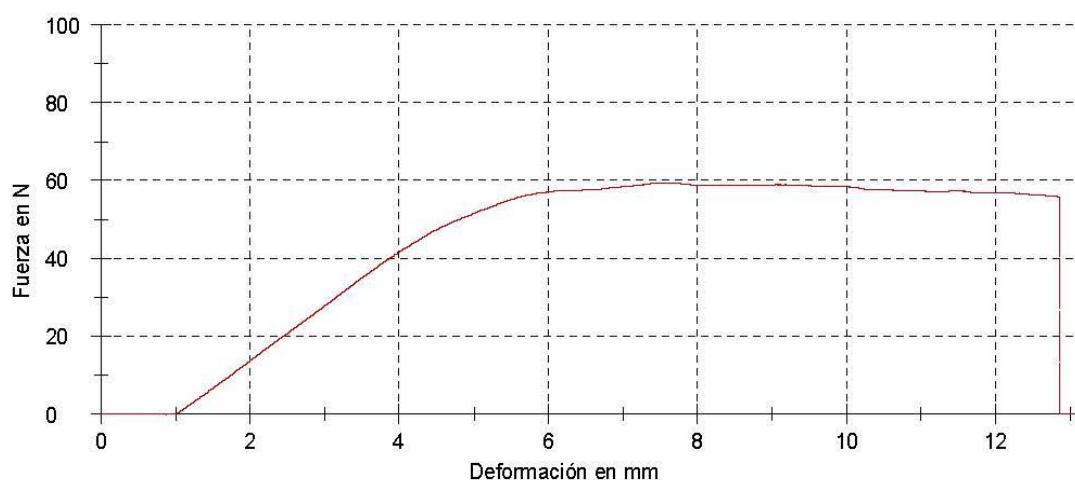
Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº. : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

Velocidad módulo de flexión : 5 mm/min
 Velocidad de ensayo : 5 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_f MPa	$\sigma_{0,1}$ MPa	$\sigma_{0,2}$ MPa	σ_{x1} MPa	σ_{TC} MPa	σ_{TY} MPa	ε_{TY} %	σ_{fM} MPa	ε_{fM} %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
7	-0,202	-0,231	-7,43	-0,203	-0,198	7,01	77,3	96,9	5,7	96,9	5,7	3	5	15,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_f MPa	$\sigma_{0,1}$ MPa	$\sigma_{0,2}$ MPa	σ_{x1} MPa	σ_{TC} MPa	σ_{TY} MPa	ε_{TY} %	σ_{fM} MPa	ε_{fM} %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
n = 1	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	mm ²
\bar{x}	-0,202	-0,231	-7,43	-0,203	-0,198	7,01	77,3	96,9	5,7	96,9	5,7	3	5	15,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Zwick / Roell

11.11.15

Informe de ensayos

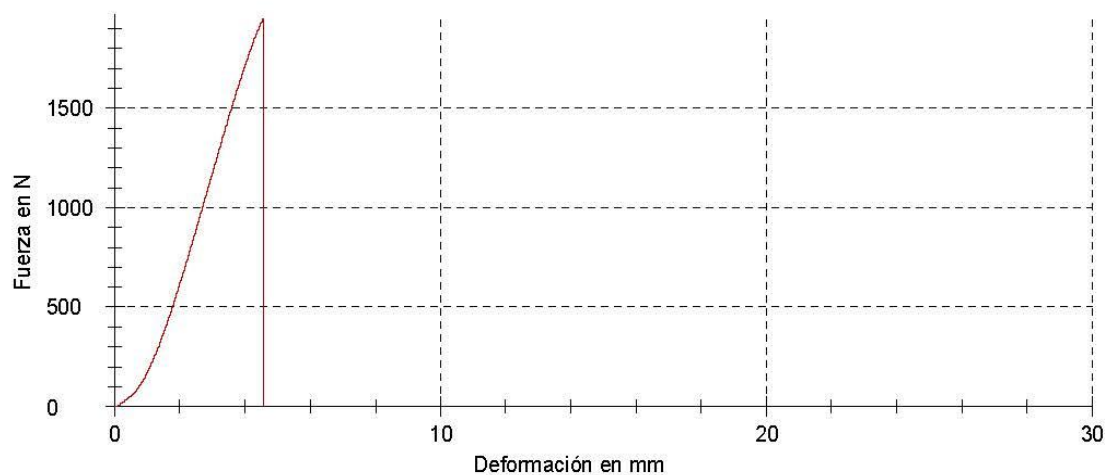
Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº. : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 1 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ε_Y %	$\varepsilon_Y (corr.)$ %	ε_{tY} %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
3	0,119	1,54	682	17,9	-	-	-	-	48,8	2,1	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ε_Y %	$\varepsilon_Y (corr.)$ %	ε_{tY} %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
n = 1	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	%	%	MPa	%	mm	mm	mm ²
\bar{x}	0,119	1,54	682	17,9	-	-	-	-	48,8	2,1	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Zwick / Roell

13.11.15

Informe de ensayos

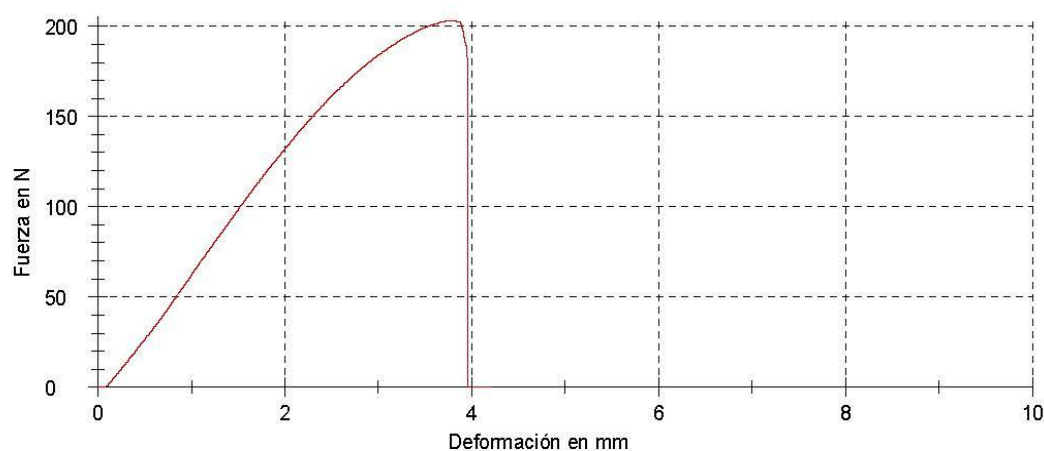
Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

Velocidad módulo de flexión : 5 mm/min
 Velocidad de ensayo : 5 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	E _r MPa	σ _{0,1} MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{TY} MPa	ε _{TY} %	σ _{TM} MPa	ε _{TM} %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
1	-	-	-	-	-	-	-	4	10	-

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	E _r MPa	σ _{0,1} MPa	σ _{0,2} MPa	σ _{TY} MPa	ε _{TY} %	σ _{TM} MPa	ε _{TM} %	h mm	b mm	A ₀ mm ²
n = 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
x	-	-	-	-	-	-	-	4	10	-
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Informe de ensayos

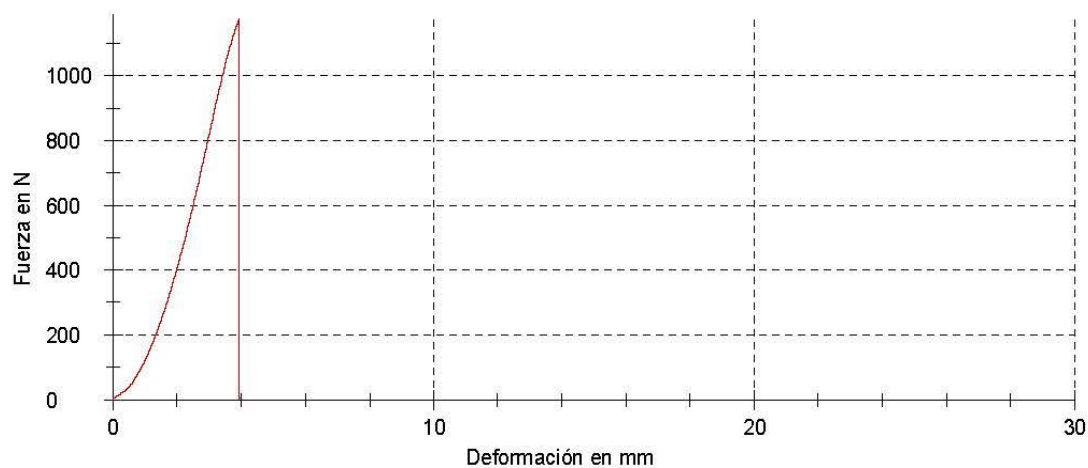
Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº. : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 1 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	Fecha	Hora	Fecha/Hora	L_0 mm	E_t MPa	σ_Y MPa	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
1	10/11/2015	16:53:34	10/11/2015 16:53:34	214,12	412	-	29,4	1,8	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	L_0 mm	E_t MPa	σ_Y MPa	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
n = 1	214,12	412	-	29,4	1,8	4	10	40,00
\bar{x}	-	-	-	-	-	-	-	-
s	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-



12.11.15

Informe de ensayos

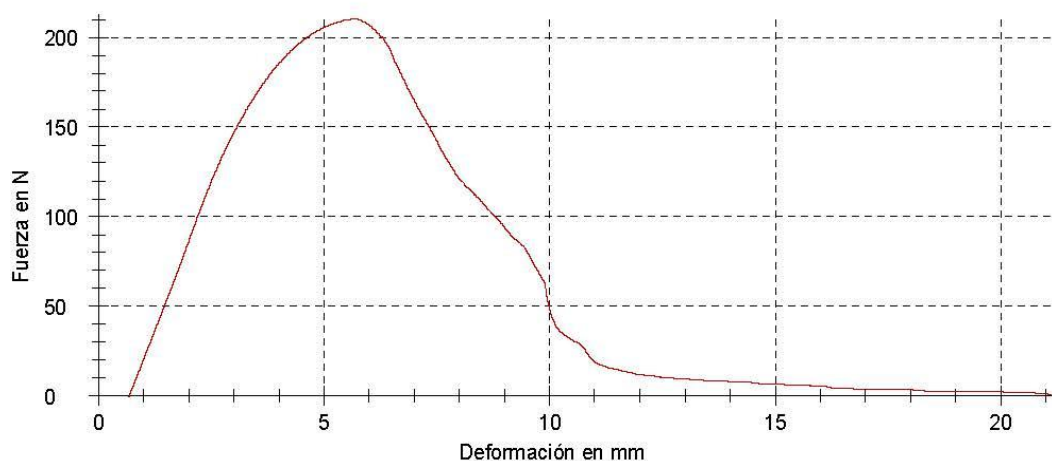
Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

Velocidad módulo de flexión : 5 mm/min
 Velocidad de ensayo : 5 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_r MPa	$\sigma_{0,1}$ MPa	$\sigma_{0,2}$ MPa	σ_{x1} MPa	σ_{fy} MPa	ε_{fy} %	σ_{fm} MPa	ε_{fm} %	h mm	b mm	A_0 mm ²
7	-1,54	-1,54	-1,98	-1,54	-1,54	-0,233	-	-	79,0	8,5	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_r MPa	$\sigma_{0,1}$ MPa	$\sigma_{0,2}$ MPa	σ_{x1} MPa	σ_{fy} MPa	ε_{fy} %	σ_{fm} MPa	ε_{fm} %	h mm	b mm	A_0 mm ²
n = 1	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	mm ²
x	-1,54	-1,54	-1,98	-1,54	-1,54	-0,233	-	-	79,0	8,5	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Zwick / Roell

11.11.15

Informe de ensayos

Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº. : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

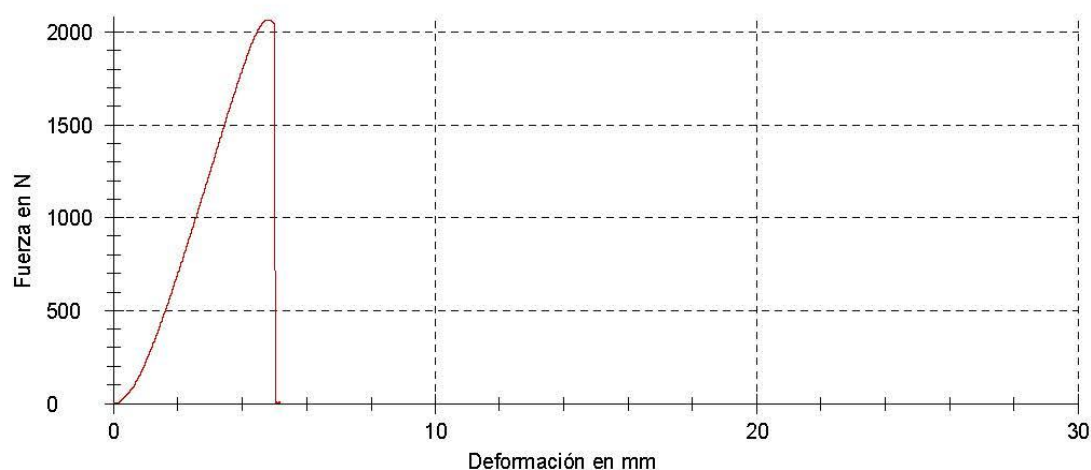
Velocidad módulo de tracción : 5 mm/min
 Velocidad de ensayo : 5 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	Identificación de la probeta	Fecha	Hora	Fecha/Hora	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa
16		11/11/2015	19:00:01	11/11/2015 19:00:01	0,0437	1,82	761	19,4	-

Nº	ε_Y %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
16	-	51,6	2,2	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ε_Y %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
n = 1											
\bar{x}	0,0437	1,82	761	19,4	-	-	51,6	2,2	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Informe de ensayos

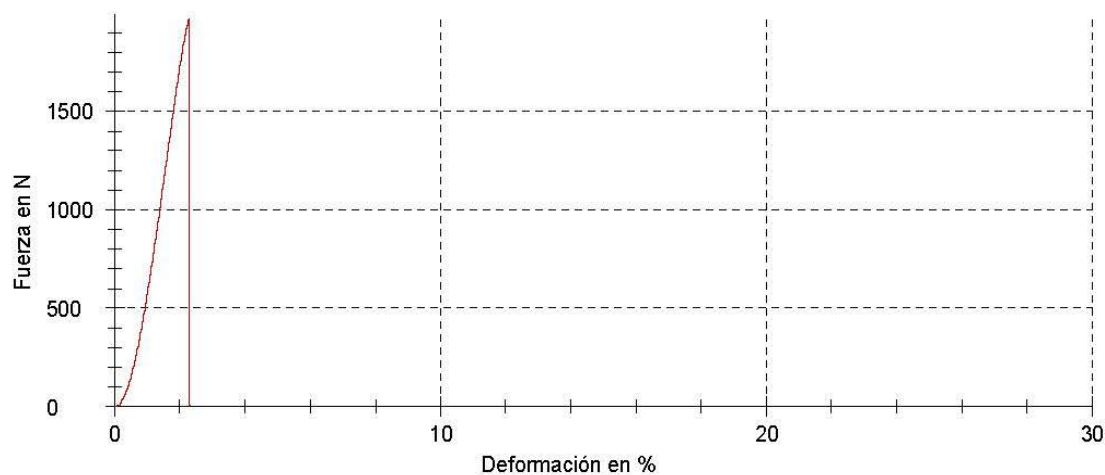
Cliente : Tipo de probeta :
 Orden-Nº. : Pretratamiento :
 Norma de ensayo : Analista :
 Tipo e identificación : Observación :
 Material : Datos máquina :
 Toma de la muestra :

Velocidad módulo de tracción : 1 mm/min
 Velocidad de ensayo : 1 mm/min

Resultados de ensayo:

Nº	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ε_Y %	$\varepsilon_Y (corr.)$ %	ε_{tY} %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
2	0,0676	0,997	475	14,4	-	-	-	-	49,3	2,3	4	10	40,00

Gráfico Serie:



Estadística:

Serie	σ_{low} MPa	σ_{high} MPa	E_t MPa	σ_{x1} MPa	σ_Y MPa	ε_Y %	$\varepsilon_Y (corr.)$ %	ε_{tY} %	σ_M MPa	ε_M %	h mm	b mm	A_0 mm ²
n = 1	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	%	%	MPa	%	mm	mm	mm ²
\bar{x}	0,0676	0,997	475	14,4	-	-	-	-	49,3	2,3	4	10	40,00
s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

*Herramienta para la definición
de diferentes estrategias de impresión
en tecnología FDM. Ensayos mecánicos*



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza